

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky

**Stabilita plavidla proti převržení**

**The Vessel Stability Against Tilting**

Student: Petr Grygar

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.

Ostrava 2010

## Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Grygar**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **3901R003 Aplikovaná mechanika**  
Téma: **Stabilita plavidla proti převržení.  
The Vessel Stability Against Tilting.**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky
2. Stabilita plavidla proti převržení
3. Pásová doprava po vodní hladině
4. Stabilita pontonového plováku - analytický výpočet
5. Stabilita pontonového plováku - řešení modelováním
6. Vyhodnocení
7. Možnosti 3D modelování
8. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

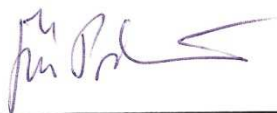
Juliš K., Tepřík O., Slavík A. : Statika. SNTL, Praha, 1987.  
Žádník B. : Stavba a opravy lodí. Nakladatelství dopravy a spojů. Praha, 1980.  
Vocílka J. : Pravidla pro klasifikaci a stavbu plavidel vnitrozemské plavby. Část IV. Stabilita. Český lodní a průmyslový registr. Praha, 1995.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

Petr Grygar

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3)
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

.....

Petr Grygar

Ostrava, Mariánské hory

V zátiší 673/11

Okr. Ostrava-město

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

GRYGAR, P. *Stabilita plavidla proti převržení : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2010, 56s. Vedoucí práce: Podešva, J.

Bakalářská práce se zabývá stabilitou pásových dopravníků, využívaných k dopravě vytěžené suroviny přes vodní hladinu v dolech. V úvodu práce jsou vysvětleny důležité pojmy, jako je vztlaková síla nebo těžiště. Samotný výpočet statické stability je nejprve proveden analyticky pro poměrně jednoduchý tvar plováků plovoucí otoče, a to v příčném i podélném směru. Z důvodu složitosti analytického výpočtu pro složitější tvary plováku je dále uvedeno řešení metodou 2D i 3D modelování. Modelování je provedeno v programu Ansys, v příloze pak jsou uvedena použitá makra pro zjednodušení výpočtu. Výstupem výpočtu statické stability je úhel, při kterém dojde k převrnutí plavidla. Je zde pak uveden i postup výpočtu dynamické stability a maximální působící síly zajišťující nepřevrnutí plavidla.

## **ANOTATION OF BACHELOR THESIS**

GRYGAR, P. *The Vessel Stability Against Tilting: Bachelor Thesis*: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics, 2010, 56 p. Thesis head: Podešva, J.

The bachelor thesis is dealing with the stability of belt conveyors used to transport excavated material through the surface of the water in the mines. The introduction explains important terms such as buoyancy force or centre of gravity. The calculation of static stability itself is first performed analytically for relatively simple shape of floats of floating pivots, in the transverse and longitudinal directions. Due to the complexity of the analytical calculation for the complicated shape of the float, a solution using 2D and 3D modeling is also included. Modeling is done in a computer program Ansys, macros used to simplify the calculation are stated in the attachment. The output of the calculation of the static stability is the angle at which the vessel will capsize. There is also included a procedure to calculate the dynamic stability and maximum actuating force to ensure the vessel will not capsize.

## OBSAH

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY .....	4
1.1 VZTLAKOVÁ SÍLA .....	5
1.2 TĚŽIŠTĚ PLOCHY, TĚŽIŠTĚ HMOT .....	8
2. PÁSOVÁ DOPRAVA PO VODNÍ HLADINĚ .....	10
3. STABILITA PLAVIDLA PROTI PŘEVŘZENÍ .....	12
3.1 STABILITA PRO MALÉ ÚHLY NÁKLONU .....	13
3.2 STABILITA PRO VELKÉ ÚHLY NÁKLONU .....	16
4. STABILITA PONTONOVÉHO PLOVÁKU - ANALYTICKÝ VÝPOČET .....	18
4.1 PŘÍČNÁ STABILITA PLOVOUCÍ OTOČE .....	20
4.2 PODÉLNÁ STABILITA PLOVOUCÍ OTOČE.....	28
5. STABILITA PÁSOVÉHO DOPRAVNÍKU S PRŮBĚŽNÝMI PLOVÁKY - ŘEŠENÍ MODELOVÁNÍ.....	37
5.1 STABILITA PÁSOVÉHO DOPRAVNÍKU S PRŮBĚŽNÝMI PLOVÁKY - 2D MODELOVÁNÍ .....	38
5.2 STABILITA PÁSOVÉHO DOPRAVNÍKU S PRŮBĚŽNÝMI PLOVÁKY - 3D MODELOVÁNÍ .....	43
6. DYNAMICKÁ STABILITA PLOVOUCÍ OTOČE .....	48
7. ZÁVĚR .....	52
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	54
PŘÍLOHY .....	55

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$A_S, A_K$	[J]	práce stabilizujícího a klopného momentu
$a$	[m]	šířka plováku, strana trojúhelníku
$b, c$	[m]	strany trojúhelníku
$d, e$	[m]	vzdálenost působíště síly
$F$	[N]	síla
$F_a, F_b, F_c$	[N]	síly působící na strany a trojúhelníku
$F_{vz}$	[N]	vztlačková síla
$G$	[N]	tíhová síla
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení
$h$	[m]	rameno stability, hloubka
$h_c$	[m]	výška plováku
$h_g$	[m]	výška těžiště od dna plováku
$h_k$	[m]	hloubka ponoření za klidu
$h_n, h_p, h_s$	[m]	dílčí ponořené hloubky
$J$	[m <sup>4</sup> ]	moment setrvačnosti plochy
$l$	[m]	délka
$M_0$	[N·m]	moment potřebný pro vychýlení o 1°
$M_{1x}, M_{1y}, M_{2x}, \text{atd.}$	[m <sup>3</sup> ]	statické momenty ploch
$M_K, M_S, M_D$	[N·m]	moment klopný, stabilizující a destabilizující
$\overline{MP}_0, r_0$	[m]	metacentrický poloměr
$\overline{MT}$	[m]	metacentrická výška
$m$	[kg]	hmotnost
$O$	[m <sup>3</sup> ]	objem
$p$	[Pa]	tlak, ponor
$R$	[m]	poloměr
$r$	[m]	rozteč průběžných plováků, rameno vztlačkové síly
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$\overline{TP}_0$	[m]	vzdálenost mezi těžištěm hmotnosti a těžištěm ponořeného objemu
$x_p, y_p$	[m]	souřadnice polohy těžiště ponořeného objemu
$x_T, y_T, z_T$	[m]	souřadnice polohy těžiště

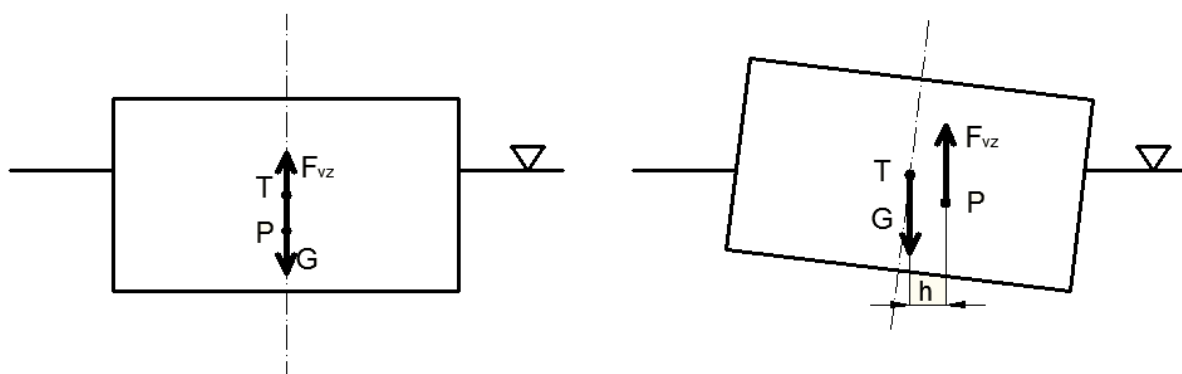
$z_M, z_T$	[m]	výška metacentra/ těžiště od dna plavidla
$\alpha$	[°]	úhel svírající dvě strany trojúhelníku
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
$\varphi$	[°]	úhel naklopení
M		metacentrum
P		těžiště ponořeného objemu
T		těžiště hmot



## 1. Úvod do problematiky

Tato bakalářská práce na téma „Stabilita plavidla proti převržení“ se konkrétně zabývá problematikou stability pásových dopravníků, určených pro přepravu nejrozličnějších druhů vytěžených hornin přes vodní hladinu (podrobněji rozebráno v další kapitole). Cílem této práce je zjistit, jak analytickou metodou, tak i modelováním, vlastnosti různých tvarů plováků při jejich naklápění. Dále je potřeba určit, které tvary jsou vhodné a mezní stavy naklápění i s příslušnými diagramy popisujícími tento stav. Také se zde nachází vysvětlení základních parametrů takového plováku a postupy pro jejich určení, jako například jeho stabilita, velikost vztlakové síly, těžiště atp.

Všechny níže uvedené postupy a výpočty jsou dle platných norem či obvyklých postupů určených pro jejich řešení. Základní úvahou celého řešení je existence stabilizujícího, či destabilizujícího momentu, vzniklého od silové dvojice vztlakové síly  $F_{vz}$  a tíhové síly  $G$ . Každá z těchto sil působí obecně v jiném bodě plavidla. Tíhová síla v těžišti hmot  $T$ , vztlaková síla v těžišti ponořeného objemu  $P$ . Pokud se těleso nachází v rovnovážném stavu, mají obě výše zmíněné síly stejnou velikost a působí na stejné nositelce, což má za následek, že se plavidlo nenaklápí, nevynořuje, ale ani nepotápí. Začnou-li na těleso působit vnější síly, ať už provozní, nebo vlivem prostředí (vlny, vítr..), začne se těleso naklápět, působíště vztlakové síly se změní, vznikne rameno silové dvojice  $h$  a z toho příslušný moment (viz obr. 1.1). Dále v textu je vysvětlen postup řešení takového problému a určení stability plavidla.

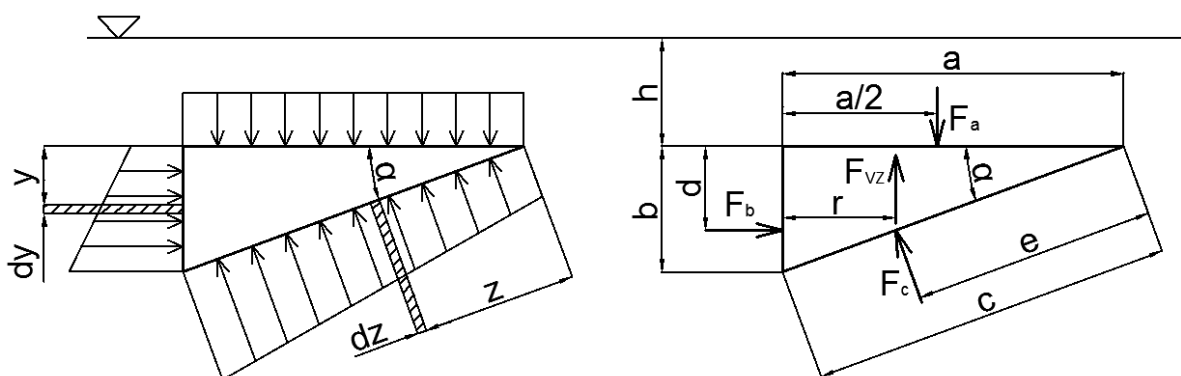


Obr. 1.1 - Působíště tíhové a vztlakové síly. a) plavidlo v rovnovážné poloze

b) nakloněné plavidlo

## 1.1 Vztlková síla

Vztlková síla  $F_{vz}$  je výslednice sil vzniklých vlivem hydrostatického tlaku působícího na stěny tělesa. Takový případ je znázorněn na obr. 1.2. Velikost hydrostatického tlaku a příslušné síly určíme z obecně známých vztahů (1.1) a (1.2). Zde  $h$  je hloubka vyšetřované plochy,  $\rho$  je hustota kapaliny (pro vodu  $1000\text{kg/m}^3$ ),  $g$  je gravitační zrychlení ( $9,81\text{m/s}^2$ ) a konečně  $S$  je velikost dané plochy.



Obr. 1.2 - Vztlková síla

$$p(y) = \rho \cdot g \cdot (h + y) \quad (1.1)$$

$$F = p(y) \cdot S \quad (1.2)$$

Uvažujme trojúhelníkové těleso, znázorněné na obr. 1.2, o stranách  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , jehož strany  $a$  a  $c$  svírají úhel  $\alpha$  a jehož délka je  $l$ . Těleso je celé ponořeno v kapalině tak, že jeho horní strana  $a$  je v hloubce  $h$ . Tlak působící na stranu  $a$  je konstantní, neboť i hloubka celé plochy je konstantní. U stran  $b$  a  $c$  tlak lineárně narůstá dle vztahu (1.1). Po dosazení do (1.1), (1.2) a případné integraci a upravení vzniknou vztahy pro velikost působící síly na jednotlivé plochy

$$F_a = p(y) \cdot S = p(y) \cdot a \cdot l = \rho \cdot g \cdot h \cdot a \cdot l \quad (1.3)$$

$$F_b = p(y) \cdot S = \int_0^b p(y) \cdot l \cdot dy = \int_0^b \rho \cdot g \cdot (h + y) \cdot l \cdot dy = \rho \cdot g \cdot l \cdot b \cdot \left(h + \frac{b}{2}\right) \quad (1.4)$$

$$F_c = p(y) \cdot S = \int_0^c p(y) \cdot l \cdot dz = \int_0^b \rho \cdot g \cdot (h + y) \cdot l \cdot \frac{dy}{\sin(\alpha)} = \rho \cdot g \cdot l \cdot c \cdot \left(h + \frac{b}{2}\right) \quad (1.5)$$

Pro vyjádření síly  $F_c$  byl směr  $z$  promítnut do směru  $y$  viz vztahy (1.6), (1.7) a (1.8).

$$z = \frac{y}{\sin(\alpha)} \quad (1.6)$$

$$dz = \frac{dy}{\sin(\alpha)} \quad (1.7)$$

$$c = \frac{b}{\sin(\alpha)} \quad (1.8)$$

Dále pokračujeme sestavením rovnic rovnováhy pro vodorovný a svislý směr, nejdříve tedy pro vodorovný (1.9).

$$\sum F_x = F_b - F_c \cdot \sin(\alpha) = \rho \cdot g \cdot l \cdot b \cdot \left(h + \frac{b}{2}\right) - \rho \cdot g \cdot l \cdot c \cdot \left(h + \frac{b}{2}\right) \cdot \sin(\alpha) = 0 \quad (1.9)$$

Po úpravě a použití vztahu (1.8) vyšlo (1.9) rovno nule. Tento výsledek je správný, pokud by vyšla jakákoliv jiná hodnota, ať už kladná či záporná, znamenalo by to posuv tělesa jedním nebo druhým směrem, což je samozřejmě nesmysl. Dále pokračujeme rovnicí rovnováhy pro svislý směr (1.10) s použitím vztahu (1.11).

$$\begin{aligned} \sum F_y = F_c \cdot \cos(\alpha) - F_a &= \rho \cdot g \cdot l \cdot c \cdot \left(h + \frac{b}{2}\right) \cdot \cos(\alpha) - \rho \cdot g \cdot h \cdot a \cdot l = \\ &= \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot a \cdot b \cdot l \end{aligned} \quad (1.10)$$

$$\cotan(\alpha) = \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\alpha)} = \frac{a}{b} \quad (1.11)$$

Po rozboru (1.10) zjistíme, že se skládá z objemu tělesa  $\frac{1}{2} \cdot a \cdot b \cdot l$ , hustoty kapaliny  $\rho$  a gravitačního zrychlení  $g$ , což je hmotnost kapaliny tělesem vytlačené. Výsledný vztah je tedy zcela v platnosti s Archimédovým zákonem. Dále je potřeba určit působíště sil působících na jednotlivé plochy. Každá ze sil působí v těžišti obrazce popisujícího průběh tlaku po dané straně (viz obr. 1.2). Obrazec popisující průběh tlaku po straně  $a$  je obdélník, tudíž síla  $F_a$  působí uprostřed této strany. Po stranách  $b$  a  $c$  tlak lineárně roste, proto určíme působíště z momentové podmínky. Moment ke kterémukoli bodu vyvozený danou silou a příslušným ramenem je roven momentu vyvozenému tlakem k témuž bodu.

$$F_b \cdot d = \int_0^b p_{(y)} \cdot y \cdot l \cdot dy = \int_0^b \rho \cdot g \cdot l \cdot (h + y) \cdot y \cdot dy = \rho \cdot g \cdot l \left( \frac{1}{2} \cdot h \cdot b^2 + \frac{1}{3} \cdot b^3 \right) \quad (1.12)$$

Vzdálenost  $d$  je tedy s využitím (1.4).

$$d = \frac{\rho \cdot g \cdot l \left( \frac{1}{2} \cdot h \cdot b^2 + \frac{1}{3} \cdot b^3 \right)}{\rho \cdot g \cdot l \cdot b \cdot \left( h + \frac{1}{2} \cdot b \right)} = b \cdot \frac{3 \cdot h + 2 \cdot b}{6 \cdot h + 3 \cdot b} \quad (1.13)$$

Nyní analogicky pro souřadnici z a sílu  $F_c$  opět s použitím vztahů (1.6),(1.7).

$$\begin{aligned} F_c \cdot e &= \int_0^c p_{(y)} \cdot y \cdot l \cdot dz = \int_0^b \rho \cdot g \cdot l \cdot (h + y) \cdot \frac{y}{\sin(\alpha)} \cdot \frac{dy}{\sin(\alpha)} = \\ &= \rho \cdot g \cdot l \left( \frac{1}{2} \cdot h \cdot b^2 + \frac{1}{3} \cdot b^3 \right) \frac{1}{\sin^2(\alpha)} \end{aligned} \quad (1.14)$$

Nyní použijeme (1.5) a upravíme.

$$e = \frac{\rho \cdot g \cdot l \left( \frac{1}{2} \cdot h \cdot b^2 + \frac{1}{3} \cdot b^3 \right) \frac{1}{\sin^2(\alpha)}}{\rho \cdot g \cdot l \cdot c \cdot \left( h + \frac{b}{2} \right)} = c \cdot \frac{3 \cdot h + 2 \cdot b}{6 \cdot h + 3 \cdot b} \quad (1.15)$$

$$e = \frac{d}{\sin(\alpha)} \quad (1.16)$$

Jelikož platí vztah (1.16), je zřejmé, že obě síly  $F_a$  i  $F_b$  mají své působíště ve stejné hloubce. Nyní stačí vyjádřit rameno vztlakové síly  $r$  (viz obr. 1.2). Pro tento úkon použijeme předešlou úvahu o momentové podmínce. A tedy, že moment výsledné vztlakové síly  $F_{vz}$  k libovolnému bodu musí být roven součtu momentů k témuž bodu všech sil. Zde lze použít zjednodušení spočívající v ignoraci síly  $F_b$  a vodorovné složky síly  $F_c$ . Obě tyto síly mají totiž stejnou velikost, stejně velké uvažované rameno a jsou opačného směru, tedy jejich momenty se odečtou. Dále s použitím vztahů (1.3),(1.5) a (1.19) získáme (1.17) a (1.18).

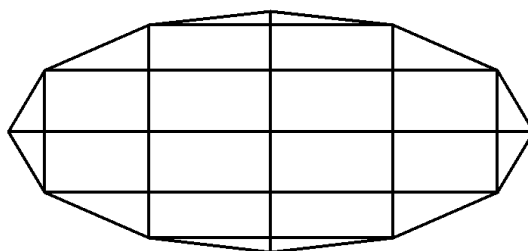
$$F_{vz} \cdot r = F_c \cdot \cos(\alpha) \cdot (a - e \cdot \cos(\alpha)) - \frac{1}{2} \cdot F_a \cdot a \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} r &= \frac{F_c \cdot \cos(\alpha) \cdot (a - e \cdot \cos(\alpha)) - \frac{1}{2} F_a \cdot a}{F_c \cdot \cos(\alpha) - F_a} = \frac{\rho \cdot g \cdot l \cdot \frac{b}{\sin(\alpha)} \cdot \left( h + \frac{b}{2} \right) \cdot \cos(\alpha) \cdot (a - e \cdot \cos(\alpha)) - \frac{1}{2} \rho \cdot g \cdot h \cdot a \cdot l}{\rho \cdot g \cdot l \cdot \frac{b}{\sin(\alpha)} \cdot \left( h + \frac{b}{2} \right) \cdot \cos(\alpha) - \rho \cdot g \cdot h \cdot a \cdot l} = \\ &= \frac{b \cdot \left( h + \frac{b}{2} \right) \cdot \cotan(\alpha) \cdot (a - e \cdot \cos(\alpha)) - \frac{1}{2} h \cdot a^2}{b \cdot \left( h + \frac{b}{2} \right) \cdot \cotan(\alpha) - h \cdot a} = \frac{\left( h + \frac{b}{2} \right) \cdot (a - e \cdot \cos(\alpha)) - \frac{1}{2} h \cdot a}{\left( h + \frac{b}{2} \right) - h} = \\ &= a \cdot \frac{\left( h + \frac{b}{2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{3 \cdot h + 2 \cdot b}{6 \cdot h + 3 \cdot b} \right) - \frac{1}{2} h}{\frac{b}{2}} = a \cdot \frac{\left( h + \frac{b}{2} \right) \cdot \left( \frac{6 \cdot h + 3 \cdot b - 3 \cdot h - 2 \cdot b}{6 \cdot h + 3 \cdot b} \right) - \frac{1}{2} h}{\frac{b}{2}} = a \cdot \frac{(2 \cdot h + b) \cdot \left( \frac{3 \cdot h + b}{6 \cdot h + 3 \cdot b} \right) - h}{b} = \\ &= a \cdot \frac{(2 \cdot h + b) \cdot \frac{3 \cdot h + b}{3 \cdot (2 \cdot h + b)} - h}{b} = a \cdot \frac{\frac{3 \cdot h + b}{3} - h}{b} = a \cdot \frac{h + \frac{b}{3} - h}{b} = a \cdot \frac{1}{3} \end{aligned} \quad (1.18)$$

$$c = \frac{a}{\cos(\alpha)} \quad (1.19)$$

Výsledek rovnice (1.18) dokazuje, že působíště vztlakové síly pro trojúhelníkové těleso je v jeho těžišti, neboť těžiště trojúhelníku leží v jedné třetině vzdálenosti od strany b ve směru strany a. Odvození pro obdélníkové, či čtvercové těleso, by bylo provedeno

obdobně se stejným výsledkem. Jelikož plochu jakéhokoliv tvaru lze rozdělit na určitý (někdy i limitně nekonečný) počet trojúhelníků a obdélníků (viz obr. 1.3), lze konstatovat, že působíště vztahové síly je vždy v těžišti ponořené plochy bez ohledu na její tvar.



Obr. 1.3 - Rozdělení plochy na čtyřúhelníky a trojúhelníky

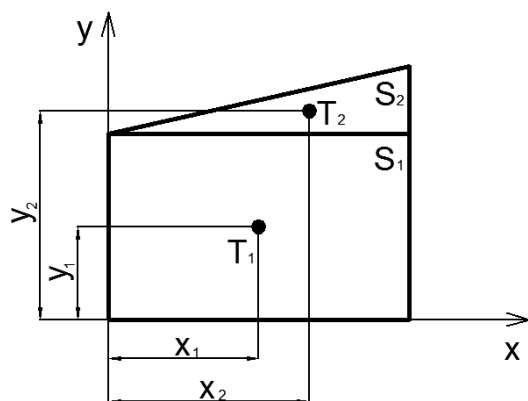
## 1.2 Těžiště plochy, těžiště hmot

Pro určení těžiště hmot i těžiště plochy se používají obdobné postupy. Nejprve je vždy nutno řešenou plochu či těleso rozdělit na části, jejichž polohu těžišť známe a dle vztahu (1.20) až (1.22) „sečíst“. Uvedené vztahy jsou pro  $i=1$  do  $n$ , kde  $n$  je počet částí plochy či tělesa, na které bylo provedeno rozdělení,  $x_i$ ,  $y_i$  a  $z_i$  jsou souřadnice těžiště daných částí. Uvedené vztahy platí pro těžiště plochy, pro těžiště hmot je pouze nutno ve vztazích nahradit plochu  $S$  hmotností dané části  $m$ . Postup je znázorněn na jednoduchém příkladu a na obr. 1.4.

$$x_T = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (1.20)$$

$$y_T = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (1.21)$$

$$z_T = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (1.22)$$



Obr. 1.4 - Těžiště plochy

Příklad výpočtu:

$$x_T = \frac{S_1 \cdot x_1 + S_2 \cdot x_2}{S_1 + S_2}$$

$$y_T = \frac{S_1 \cdot y_1 + S_2 \cdot y_2}{S_1 + S_2}$$

Výše uvedený postup je možno použít jen pro tvary, u kterých obecně známe polohu jejich těžiště (čtverec, obdélník, kruh, trojúhelník...). V praxi se však lze často setkat s plochami, které jsou ohraničeny poměrně složitými křivkami, u kterých je tento postup velmi obtížný nebo nemožný. V takovémto případě je nutno sáhnout po integračním počtu. Předešlé vztahy přejdou do své obecné podoby, a to (1.23) až (1.25). Uvedené vztahy jsou opět pro těžiště plochy, pro těžiště tělesa je nutno nahradit obsah plochy, popř. diferenciál plochy, hmotností případně diferenciálem hmotnosti (u homogenních těles stačí objemem).

$$x_T = \frac{\int_S x dS}{S} \quad (1.23)$$

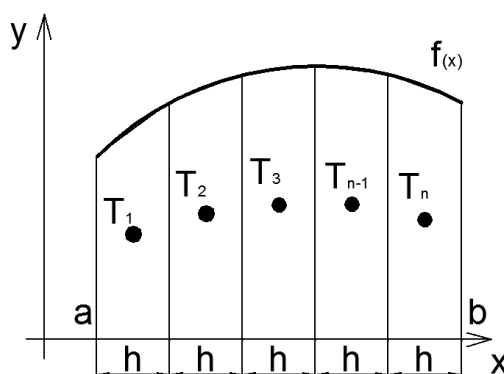
$$y_T = \frac{\int_S y dS}{S} \quad (1.24)$$

$$z_T = \frac{\int_S z dS}{S} \quad (1.25)$$

Zjištění velikosti plochy lze provést integrací křivky ohraničující plochu v daných mezích. Tento postup však lze provést pouze známe-li rovnici dané křivky, v ostatních případech je nutno křivku nahradit jinou, dobře integrovatelnou s co nejmenší odchylkou od původní křivky.

Další možností zjištění velikosti plochy a polohy těžiště je jedno ze složených pravidel pro numerickou integraci (obdélníkové, lichoběžníkové, Simpsonovo...). Nejprve plochu pod křivkou rozdělíme v mezích  $\langle a; b \rangle$  na  $n$  částí, se stejně velkým krokem  $h$ . Čím menší krok, tím přesnější výpočet, ale také náročnější. Poté vypočítáme její velikost pomocí vztahu, dle zvoleného pravidla. Například pro složené lichoběžníkové pravidlo to je vztah (1.26) [5] viz také obr. 1.5. Při výpočtu polohy těžiště pokračujeme dle vztahu (1.20) až (1.22). Z obr. 1.5 je zřejmé, že určení polohy těžišť jednotlivých úseků je poměrně snadný úkol, neboť každá část se skládá z lichoběžníku. Příklad výpočtu těžiště lichoběžníku je znázorněn na obr. 1.4.

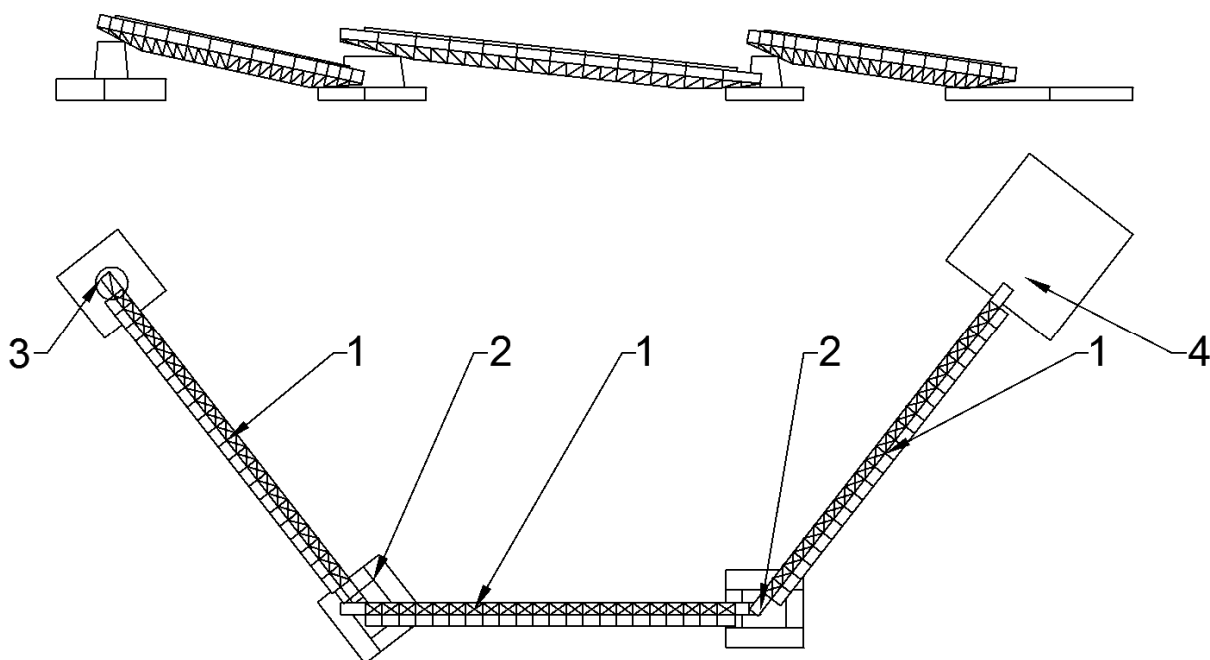
$$I_{\text{lich}} = \frac{h}{2} \cdot (f_{x_0} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} f_{x_i} + f_{x_n}) \quad (1.26)$$



Obr.1.5 - Princip lichoběžníkového pravidla

## 2. Pásová doprava po vodní hladině

V této práci bude uvažována pásová doprava přes vodní hladinu pásovými dopravníky, které mají za účel přemístit těženou sydkou horninu od těžebního bagru k místu výsypu suroviny. Celý tento proces bývá zajištěn soustavou několika dopravníků (výjimečně i jedním) vhodně seskládaných v kloubových otočích s pevným ukotvením posledního z nich na břehu. Tyto otoče se za žádných okolností nesmí dotýkat břehu ani dna. Jednotlivé pásové dopravníky musí být vůči sobě relativně natočeny o úhel v intervalu od  $10^\circ$  do  $80^\circ$  viz [4] a obr. 2.1. Toto natočení zásadním způsobem zvedá stabilitu celé soustavy a napomáhá tak odolávat nepříznivým vlivům počasí (vítr, vlny...). Druhým zásadním důvodem pro natočení je zabránění přenosu sil z bagru, umístěného na jedné straně dopravní trasy, až k pevně ukotvené stanici na břehu. Aby vlivem větru docházelo k co možná nejmenšímu samovolnému pootočení jednotlivých částí, bývá podélná osa tratě nastavena ve směru převládajícího větru. Jednotlivé části dopravní tratě jsou ukotveny k břehu kotvícími lany.



Obr. 2.1 - Sestavení plovoucí pásové tratě, 1 - pásový dopravník, 2 - plovoucí otoč, 3 - pevná otoč na břehu, 4 - Zadní část plovoucího bagru

Pásový dopravník sestává z příhradové konstrukce, na níž jsou umístěny opěrné válečky, po kterých jede pás zajišťující přemístění horniny. Pás je na jedné straně dopravníku poháněn motorem. Druh použitého pásu závisí na stoupání, které musí materiál během jízdy zdolat, pokud se jedná o poměrně malé stoupání do 2° viz [4], lze použít pás hladký, pro větší stoupání je nutno použít pás profilovaný. Užití hladkého pásu je také možné pro klesání do velikosti 12° viz [4]. Poslední úsek trasy, jež zajišťuje výsyp materiálu na určené místo na břehu, mívá z pravidla větší stoupání vlivem ukotvení na břehu, proto použití profilovaného pásu je téměř pravidlem. Na dopravníku jsou instalovány stěrače, zajišťující odstranění nalepené horniny ze spodní i horní strany pásu. Pásové dopravníky jsou také vybaveny po okrajích lávkami určenými pro údržbu i kontrolu celé dopravní tratě. Musí být navrženy tak, aby navzájem na sebe navazovaly, zároveň s ohledem na bezpečnost práce jsou opatřeny zábradlími a protiskluzovou plochou. Opět s ohledem na bezpečnost práce je celá dopravní trasa vybavena vhodnými kryty, zejména pro otáčející se části a veškerou elektroinstalaci.

Kloubové otoče mezi jednotlivými dopravníky musí zajišťovat vzájemné pootočení. Celá otoč se pak skládá ze svařené konstrukce, která má na své spodní straně (zpravidla) dva plováky ustavené ve směru osy dopravníku. Nejobvyklejší tvary plováků jsou válcový a kvádrový a jejich účelem je zajistit celé pásové trase dostatečnou plovatelnost a stabilitu. Plováky musí být vodotěsně svařeny, opatřeny dobře utěsněnými otvory pro kontrolu případných prosaků, jejich odčerpání či pro odvzdušnění.

Množství maximální převážené horniny musí být za každých okolností větší, než je maximální množství horniny dodávané bagrem na pás. Rozjezd pásu je prováděn od posledního dopravníku po první, vypínání opačně tak, aby vždy byly všechny dopravníky po vypnutí vyprázdněny, popřípadě při zapnutí nehrozilo přetížení některého z nich. Toto je možno kontrolovat čidly (či kamerovým systémem) umístěnými v místech přesypu z jednoho pásu na druhý. V případě jakékoliv poruchy je nutno trasu ihned vypnout, zároveň musí být konstrukčně zajištěno, aby materiál hromadící se v místě přesypu svým přepadáváním přes okraj dopravníku nijak neohrožoval stabilitu tratě, například dopadáním na plováky. Celá trasa je vybavena brzdou tak, aby z kteréhokoli místa mohla obsluha v případě poruchy trať vypnout. Provoz dopravní tratě není možný na zamrzlé vodě a během zimních měsíců je potřeba celou trať zazimovat a chránit před poškozením ledem (vysekávání, čeření vody...). Není možné používat pásovou trať při větší rychlosti větru než 17 m/s viz [4]. Obsluha tratě musí mít příslušnou kvalifikaci a praxi. Před každou směnou je nutno provést úklid a kontrolu celé tratě.



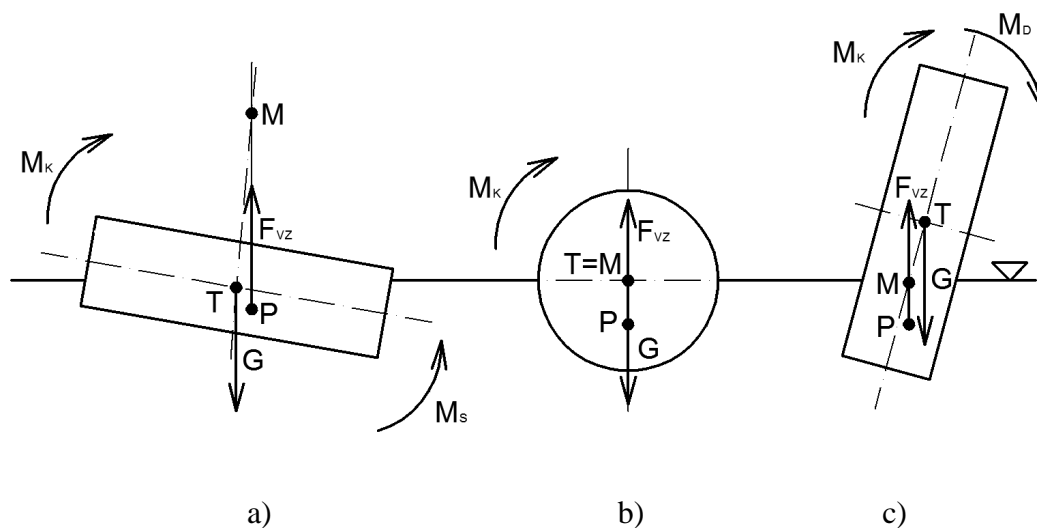
### 3. Stabilita plavidla proti převržení

Stabilita plavidla je jeho vlastnost určující schopnost vrátit se do rovnovážné polohy po jeho vychýlení. Stabilita plavidla se dále dělí podle několika hledisek:

- Dle časové závislosti vnějších sil:
  - a) *Statická* (síla v kotevních lanech, převážený náklad...): Určuje se z velikosti vratného momentu při vychýlení.
  - b) *Dynamická* (vítr, vlny, proměnná zátěž): Určuje se z maximální práce při naklápění, která plavidlo ještě nepřevrhne.
- Dle velikosti výchylky:
  - c) *Stabilita při malých náklonech*: Zde je použito zjednodušených vztahů platících přibližně pro malé hodnoty vychylek.
  - d) *Stabilita při velkých náklonech*: Kompletní výpočet.
- Dle osy, okolo které se plavidlo naklápí:
  - e) *Příčná*: Naklápění okolo podélné osy (kolébání).
  - f) *Podélná*: Naklápění okolo příčné osy (houpání).

O stabilitě plavidla rozhoduje vzájemná poloha takzvaného metacentra  $M$  a těžiště hmotnosti  $T$ . Metacentrum je průsečík nositelky vztlakové síly  $F_{vz}$  s osou plování. Začneme-li působit na plavidlo klopným momentem  $M_K$ , mohou nastat 3 základní stavy stability, které jsou znázorněny na obr. 3.1, a to:

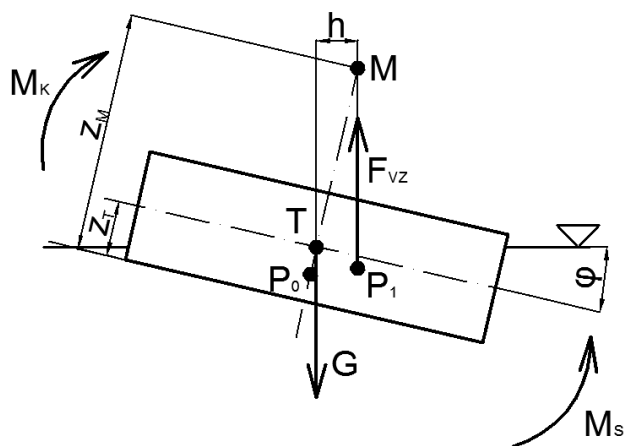
- a) *Stabilní*: Tento stav nastane, nachází-li se metacentrum  $M$  nad těžištěm hmotnosti  $T$ . V tomto případě vznikne stabilizující moment  $M_S$ , snažící se plavidlo vrátit do původní polohy.
- b) *Indiferentní*: Tento případ nastane v situaci, kdy poloha metacentra  $M$  je totožná s polohou těžiště hmot  $T$ .
- c) *Labilní*: Plavidlo je v labilní poloze, pokud je těžiště hmot  $T$  nad metacentrem  $M$ . V takovém případě vznikne moment destabilizující  $M_D$ , který má snahu těleso převrátit.



Obr. 3.1 - Základní stavy stability. a) stabilní, b) indiferentní, c) labilní

### 3.1 Stabilita pro malé úhly náklonu

Pokud dojde k naklonění tělesa o úhel  $\varphi$  vlivem klopného momentu  $M_K$  z rovnovážné polohy, zůstává těžiště hmotnosti  $T$ , jako působiště tíhové síly  $G$ , stále na stejném místě. Změní se však poloha těžiště ponořeného objemu, z polohy  $P_0$  do polohy  $P_1$ . Body  $P_0$ ,  $P_1$  jsou působiště vztlačové síly  $F_{vz}$ . Z tohoto vyplývá vznik silové dvojice stejně velkých sil  $G$  a  $F_{vz}$  na rameni  $h$ , které se nazývá rameno stability, čímž vzniká stabilizující moment  $M_S$ . Další řešení stability pro malé úhly náklonu je převzato z [4].



Obr. 3.2 - Stabilita pro malé úhly náklonu

Z obrázku 3.2 můžeme určit následující stavy stability:

$z_M > z_T$  plavidlo je stabilní

$z_M \cong z_T$  plavidlo je labilní

$z_M < z_T$  plavidlo je nestabilní

Dále definujeme pojem metacentrická výška značená  $\overline{MT}$ . Z obr. 3.2 vyplývá vztah (3.1) pro její určení.

$$\overline{MT} = \overline{MP_0} - \overline{TP_0} \quad (3.1)$$

Kde  $\overline{TP_0}$  je vzdálenost mezi těžištěm hmotnosti a těžištěm ponořeného objemu. Dále  $\overline{MP_0}$  je metacentrický poloměr  $r_0$ , pro jehož určení lze použít vztah (3.2) [4]. Jedná se o vzdálenost mezi metacentrem a těžištěm ponořeného objemu.

$$r_0 = \frac{J}{O} \quad (3.2)$$

Kde  $J$  je moment setrvačnosti plochy vodorysy k podélné ose plováku a  $O$  je ponořený objem. Metacentrická výška  $\overline{MT}$  určuje míru stability plavidla poněvadž platí, že čím větší je metacentrická výška, tím větší je rameno stability  $h$ . Z obr. 3.2 jasně vyplývá vztah (3.3).

$$h = \overline{MT} \cdot \sin(\varphi) \quad (3.3)$$

Dále lze určit velikost stabilizujícího momentu  $M_S$  s využitím vztahu (3.3).

$$M_S = F_{vz} \cdot h = F_{vz} \cdot \overline{MT} \cdot \sin(\varphi) \quad (3.4)$$

Běžně se u plavidel uvádí velikost klopného momentu  $M_K$ , značeného jako  $M_0$ , jež vychýlí plovoucí těleso o  $1^\circ$ . Určíme jej ze vztahu (3.5).

$$M_0 = F_{vz} \cdot \overline{MT} \cdot \sin(1^\circ) \quad (3.5)$$

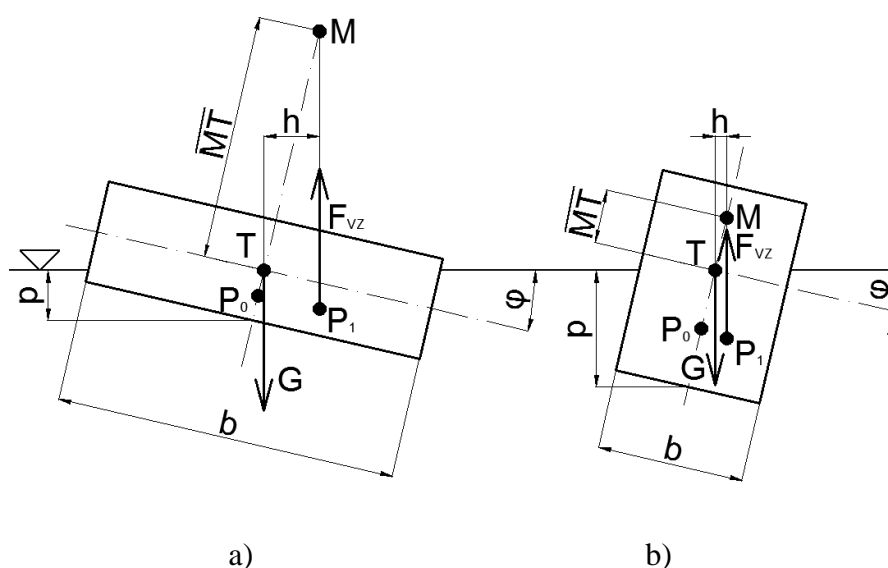
Z čehož můžeme určit přibližnou hodnotu výchylky v radiánech pro malé úhly náklonu, viz (3.6)

$$\varphi = \frac{M_K}{M_0} \quad (3.6)$$

Vlivy ovlivňující velikost metacentrické výšky se dělí do dvou základních skupin a to:

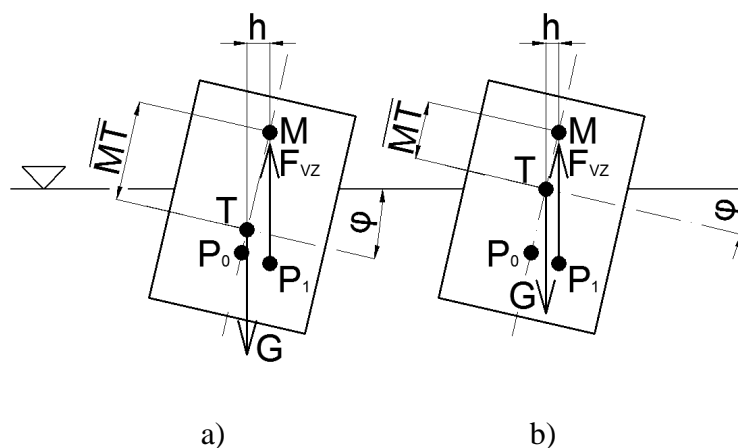
- a) vliv tvaru plavidla
- b) vliv polohy těžiště

Pro posouzení velikosti metacentrické výšky z hlediska tvaru plavidla je zásadní poměr mezi jeho šířkou  $b$  a ponorem  $p$ . Uvažujme 2 plovoucí tělesa se stejnou velikostí ponořené plochy, která se vychýlila o stejný úhel  $\varphi$ . Z obr. 3.3 je patrné, že těleso a), jež má větší poměr  $b/p$ , má při tomto náklonu značně větší metacentrickou výšku  $\overline{MT}$  a z ní vyplývající rameno stability  $h$  a tudíž je stabilnější, než těleso b), které má tento poměr nižší.



Obr. 3.3 - Vliv tvaru plavidla na metacentrickou výšku

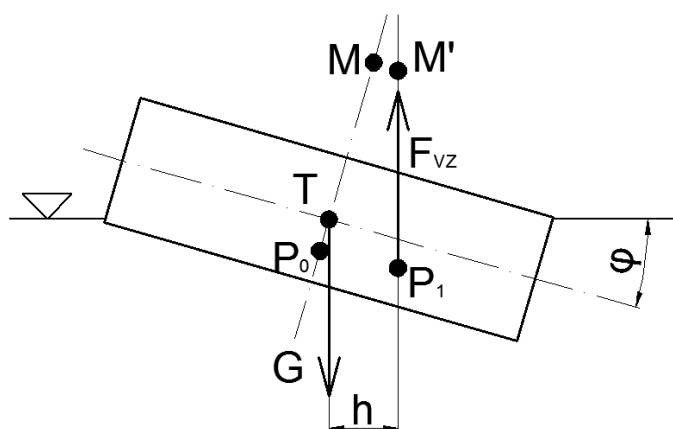
Alternativní cestou, jak zvětšit metacentrickou výšku (potažmo rameno stability), je posunout těžiště plavidla co nejnižší. Toho lze docílit například vhodnou volbou materiálu, rozložením nákladu, či konstrukčně zajistit, aby nejtěžší části byly co nejbližší ke dnu. Na obr. 3.4 je znázorněna situace, kdy jsou dvě tělesa stejných rozměrů, avšak s jinými polohami těžišť, nakloněna o stejný úhel. Je patrné, že těleso a) s níže situovaným těžištěm má metacentrickou výšku  $\overline{MT}$  i rameno stability  $h$  větší, než těleso b).



Obr. 3.4 - Vliv polohy těžiště na metacentrickou výšku

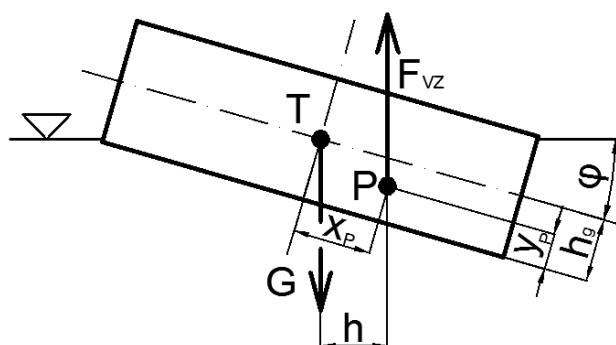
### 3.2 Stabilita pro velké úhly náklonu

Pro velké úhly náklonu (řádově  $15^\circ$  a více) již postup popsany v předešlé kapitole začíná být značně nepřesný. Tato nepřesnost je způsobena skutečností, že se metacentrum  $M$  značně vychýlí ze svislé osy plavidla viz obr. 3.5. Toto vychýlení je způsobeno linearizací celé problematiky a zanedbáním faktu, že se metacentrum pohybuje po kružnici o poloměru  $r_0$ . Navíc, aby předešlé řešení bylo platné, musí mít vynořená i ponořená část plavidla shodný tvar. Tato podmínka není splněna například, pokud dojde k potopení jedné celé hrany námi uvažovaného obdélníkového plováku.



Obr 3.5 - Změna polohy metacentra při velkých úhlech náklonu

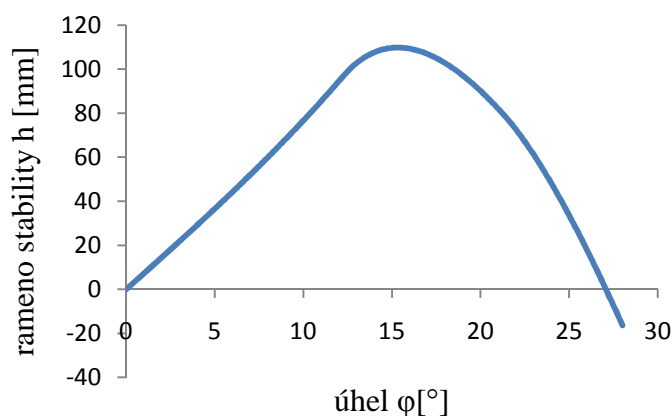
Při řešení stability plavidla pro velké úhly náklonu se již metacentrum  $M$  nepoužívá, místo toho se bere zřetel na velikost ramene stability  $h$ . Výpočet tohoto ramene je proveden dle obrázku 3.6, kde  $x_P$ ,  $y_P$  jsou souřadnice těžiště ponořeného objemu plavidla a  $h_g$  je souřadnice polohy těžiště hmotnosti. Tyto souřadnice jsou vztaženy k osám plavidla, tedy  $x$  ve směru dna a  $y$  ve směru kolmém na dno. Rameno stability je tedy dáno vztahem (3.7).



Obr .3.6 - Výpočet ramene stability

$$h = x_P \cdot \cos(\varphi) + y_P \cdot \sin(\varphi) - h_g \cdot \sin(\varphi) \quad (3.7)$$

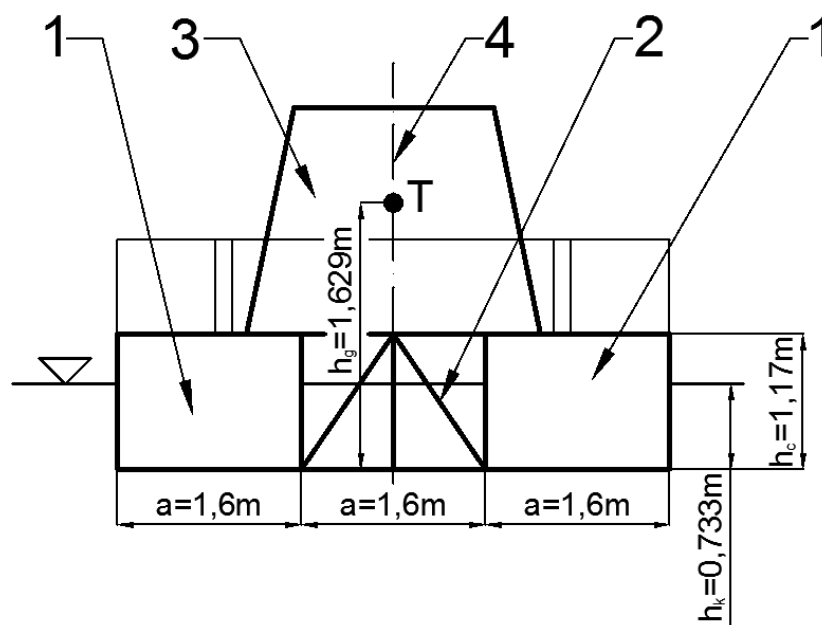
Výslednou stabilitu plavidla určuje diagram statické stability, též nazývaný Reedův diagram. V tomto diagramu je vykreslena závislost ramene stability na úhlu natočení. Na obr. 3.7 je přibližný vzhled Reedova diagramu pro plavidlo obdélníkového tvaru s blíže neurčenými rozměry. K převržení plavidla dojde při úhlu naklonění  $\varphi_p$ , při kterém se graf funkce (3.7) protne s vodorovnou osou, rameno stability  $h$  je tedy pro tuto polohu rovno nule (v tomto případě cca  $27^\circ$ ).



3.7 - Reedův diagram

#### 4. Stabilita pontonového plováku - analytický výpočet

Následuje výpočet stability konkrétní plovoucí otoče, jejíž náčrt je znázorněn na obr. 4.1. Veškeré zde uvedené rozměry, parametry či obrázky jsou odečteny z výkresové dokumentace [6]. Otoč se skládá ze dvou plováků, konstrukce zajišťující jejich spojení a nástavby sloužící pro upevnění a funkci pásových dopravníků. Pro výpočet celkového vztlaku otoče bude dále zanedbán objem ponořené části konstrukce, neboť je malý a celý výpočet by se neúměrně zkomplikoval. Rozměry plováku jsou následující: délka  $l=4,03\text{m}$  a šířka  $a=1,6\text{m}$ . Výška  $h_c$  plováku je proměnná po jeho šířce a mění se od  $1,145\text{m}$  na vnější, po  $1,2\text{m}$  na vnitřní straně, bude uvažováno průměrné  $h_c=1,17\text{m}$ .



Obr. 4.1 - Plovoucí otoč, 1- plovák, 2 - spojovací konstrukce, 3 - nástavba, 4 - osa symetrie

Pro další výpočet je stěžejní znalost polohy těžiště otoče. Je zřejmé, že bude ležet někde na ose symetrie. V jaké výšce to bude, určíme výpočtem (4.1). Hodnoty byly odečteny z výkresové dokumentace [6], kde  $m_o=4280\text{kg}$  je hmotnost plovoucí otoče,  $m_{pd}=4480\text{kg}$  je hmotnost pásového dopravníku a  $m_{dm}=694\text{kg}$  je maximální hmotnost převáženého materiálu. Výška  $h_o=0,7\text{m}$  je odhadnutá vzdálenost polohy těžiště otoče nad dnem plováku,  $h_{pdh}=3,245\text{m}$  je výška působíště tíhové síly horního pásového dopravníku a konečně  $h_{pdd}=1,55\text{m}$  je výška působíště tíhy dolního pásového dopravníku.

Výpočet je dle vztahů (1.20) až (1.22), přičemž v čitateli je součet hmotností jednotlivých částí, vynásobených příslušnou výškou působitě tíhových sil. Hmotnosti obou dopravníků (dolního i spodního) jsou uvažovány pouze ve velikosti jedné poloviny, neboť každý z dopravníků působí na dvě otoče. Ve jmenovateli je součet hmotností jednotlivých částí.

$$h_g = \frac{m_o \cdot h_o + \frac{1}{2}(m_{pd} + m_{dp}) \cdot h_{pdh} + \frac{1}{2}(m_{pd} + m_{dp}) \cdot h_{pdd}}{m_o + m_{pd} + m_{dp}} = \frac{4280 \cdot 0,7 + \frac{1}{2}(4480 + 694) \cdot 3,245 + \frac{1}{2}(4480 + 694) \cdot 1,55}{4280 + 4480 + 694} = 1,629m \quad (4.1)$$

Další podstatnou věcí pro výpočet je určení potopeného objemu plováku v rovnovážném stavu, tedy když  $\varphi=0^\circ$ . Celý výpočet vychází z rovnosti vztlakové síly  $F_{vz}$  a tíhové síly  $G$ . Ve výpočtu je  $O$  objem ponořené části plováku,  $\rho \cong 1000 \text{ kg/m}^3$  je hustota vody a  $g=9,81 \text{ m/s}^2$  gravitační zrychlení. Hmotnost  $m_c$  je součet hmotností otoče, poloviny hmotnosti obou pásových dopravníků působících na otoč a přepraveného materiálu, tedy viz (4.2)

$$m_c = m_o + m_{pd} + m_{dp} = 4280 + 4480 + 694 = 9454 \text{ kg} \quad (4.2)$$

$$F_{vz} = G \quad (4.3)$$

$$\rho \cdot O \cdot g = m_c \cdot g \quad (4.4)$$

$$\rho \cdot O = m_c \Rightarrow O = \frac{m_c}{\rho} = \frac{9454}{1000} = 9,454 \text{ m}^3 \quad (4.5)$$

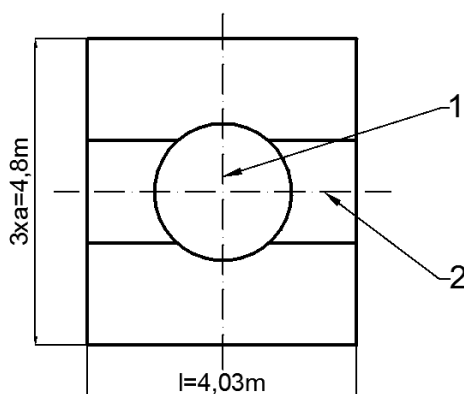
Nyní můžeme určit i hloubku  $h_k$ , v jaké je za klidu ponořen plovák, viz (4.7). Vztah vyplývá z geometrických poměrů plováku, tedy objem ponořené části lomeno celkovou půdorysnou plochou obou plováků  $S$  (4.6).

$$S = 2 \cdot a \cdot l = 2 \cdot 1,6 \cdot 4,03 = 12,896 \text{ m}^2 \quad (4.6)$$

$$h_k = \frac{O}{S} = \frac{9,454}{12,896} = 0,733 \text{ m} \quad (4.7)$$

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3, stabilita plavidla se dělí na příčnou a podélnou. K tomuto rozdělení je potřeba určit podélnou a příčnou osu plavidla. U otoče není na první pohled rozdělení zřejmé, jako to bývá například u lodí, proto si osy zvolíme libovolně viz obr. 4.2. Příčná osa byla zvolena ve směru delšího rozměru plováků, podélná pak kolmo na příčnou. Toto rozdělení os pro plovoucí otoč bude uvažováno v celé práci. Dále bude vyšetřena stabilita, jak pro příčné, tak i pro podélné naklápění.

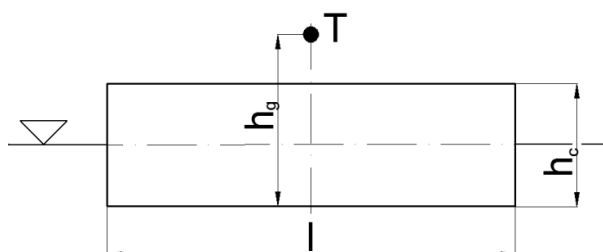




Obr. 4.2 - Osy plovoucí otoče, 1 - podélná osa, 2 - příčná osa

#### 4.1 Příčná stabilita plovoucí otoče

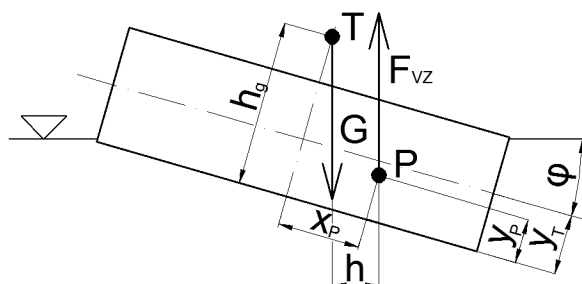
Pro příčnou stabilitu budou dále uvažovány následující rozměry plováku: délka  $l=4,03\text{m}$ , výška  $h_c=1,17\text{m}$ , dále pak  $h_g=1,629\text{m}$  (4.1) je výška těžiště plovoucí otoče nad dnem plováku. Plovák v rovnovážné poloze je znázorněn na obr 4.3.



Obr. 4.3 - Rozměry plovoucí otoče pro rovnovážný stav příčné stability

Tíhová síla  $G$  působí v těžišti hmot  $T$  ve výšce  $h_g$ , vztlačová síla  $F_{vz}$  působí v těžišti ponořené plochy  $P$ . Pokud se těleso vychýlí o úhel  $\varphi$ , přestanou obě výše zmíněné síly působit na stejné nositelce a vznikne rameno stability  $h$ . Závislost velikosti tohoto ramene na úhlu natočení se vykresluje do diagramu statické stability (Reedův diagram), jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2. Tento diagram názorně vystihuje stabilitu daného plavidla. Rovněž zde platí vztah (3.7) pro výpočet velikosti ramene stability  $h$ . Na obr. 4.4 je pak znázorněno odvození tohoto vztahu pro příčnou stabilitu této konkrétní plovoucí otoče

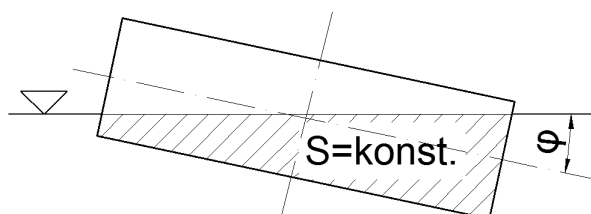
(stejný postup jako v kapitole 3.2). Ve vztahu (3.7) je výška  $h_g$  po celou dobu naklápění konstantní a mění se pouze souřadnice těžiště ponořené plochy  $x_p$  a  $y_p$ , na jejichž výpočet se nyní soustředíme.



Obr. 4.4 - Výpočet ramene stability plovoucí otoče

Dle vztahu (4.5) musí být objem ponořené části plováků konstantní, bez ohledu na aktuální úhel naklopení, a to  $O=9,454\text{m}^3$ . Je-li šířka každého z dvou plováků  $a=1,6\text{m}$ , lze dle (4.8) spočítat velikost ponořené svislé plochy, znázorněné na obr. 4.5.

$$S = \frac{O}{2 \cdot a} = \frac{9,454}{2 \cdot 1,6} = 2,954\text{m}^2 \quad (4.8)$$

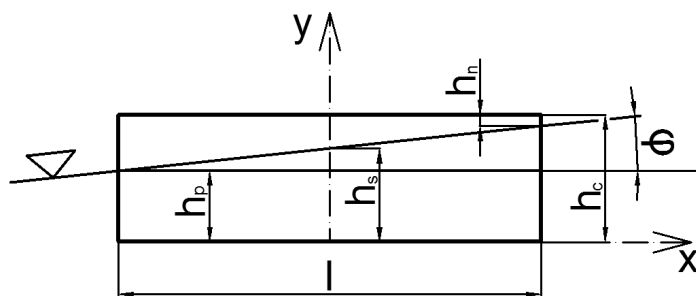


Obr. 4.5 - Velikost ponořené plochy pro příčnou stabilitu

Celý proces naklápění plováku lze rozdělit do několika fází. Pro každou takovouto fázi pak platí jiný výpočtový model k určení polohy těžiště ponořené plochy.

### 1. fáze:

Tato fáze začíná v rovnovážném stavu, kdy úhel naklonění  $\varphi=0^\circ$  a končí v momentě, kdy se ponoří pravý horní roh plováku, tento jev nastane při úhlu naklonění  $\varphi=\varphi_1$ . Situace je znázorněna na obr. 4.6, kde je pro jednoduchost uvažováno natáčení hladiny místo naklápění plováku. Výsledek je shodný a toto zjednodušení bude používáno i nadále.



Obr. 4.6 - Určení těžiště ponořené plochy 1. fáze příčné stability

Na obr. 4.6 je znázorněn zavedený souřadný systém a rozdělení ponořené lichoběžníkové plochy na dvě části, a to obdélník a trojúhelník. Nejprve odvození vztahů pro dílčí výšky hladiny. Výška průsečíku hladiny s osou plavidla je  $h_s$  a vypočteme ji dle (4.9), v této fázi je totožná s  $h_k$  dle (4.7).

$$h_s = \frac{S}{l} = \frac{2,954}{4,03} = 0,733\text{m} \quad (4.9)$$

Dále následuje výška  $h_p$ , což je hloubka, ve které je potopena levá hrana plováku a  $h_n$ , délka pravé strany plováku nad hladinou, viz (4.10) a (4.11).

$$h_p = h_s - \frac{1}{2} \cdot l \cdot \tan(\varphi) \quad (4.10)$$

$$h_n = h_c - h_s - \frac{1}{2} \cdot l \cdot \tan(\varphi) \quad (4.11)$$

Předešlé vztahy vyplývají z geometrických vlastností dle obr. 4.6. Pokud bychom chtěli znát skutečné svislé vzdálenosti  $h_s$ ,  $h_p$  a  $h_n$  s uvažováním faktu, že hladina je vodorovná a stěny nakloněné, museli bychom každou délku dle (4.9) až (4.11) vynásobit  $\cos(\varphi)$ . Dále lze napsat vztah (4.12) pro velikost ponořené plochy s využitím vlastnosti lichoběžníku.

$$S = l \cdot h_s \quad (4.12)$$

Pro odvození vztahu pro souřadnice těžiště ponořené plochy dle (1.20) a (1.21) je potřeba znát velikosti jednotlivých ploch obdélníku (4.13) a trojúhelníku (4.14).

$$S_{\text{obd}} = l \cdot h_p \quad (4.13)$$

$$S_{\Delta} = \frac{1}{2} \cdot l^2 \cdot \tan(\varphi) \quad (4.14)$$

Následně se využívá obecně známých vztahů pro polohu těžiště obdélníku a trojúhelníku. Těžiště obdélníku leží v polovině délky od protější strany, těžiště trojúhelníku pak v jedné třetině výšky od jeho základny. Konečně tedy vztahy pro výpočet těžiště ponořené plochy (4.15) a (4.16) s použitím vztahů (4.9) až (4.14).

$$\begin{aligned} x_P &= \frac{S_{\text{obd}} \cdot x_{\text{obd}} + S_{\Delta} \cdot x_{\Delta}}{S_{\text{obd}} + S_{\Delta}} = \frac{S_{\text{obd}} \cdot 0 + S_{\Delta} \cdot \left(\frac{2}{3}l - \frac{1}{2}l\right)}{S_{\text{obd}} + S_{\Delta}} = \frac{\frac{1}{2}l^2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \frac{1}{6}l}{l \cdot h_P + \frac{1}{2}l^2 \cdot \tan(\varphi)} = \\ &= \frac{\frac{1}{12}l^3 \cdot \tan(\varphi)}{l \cdot \left(h_S - \frac{1}{2}l \cdot \tan(\varphi)\right) + \frac{1}{2}l^2 \cdot \tan(\varphi)} = \frac{\frac{1}{12}l^2 \cdot \tan(\varphi)}{h_S - \frac{1}{2}l \cdot \tan(\varphi) + \frac{1}{2}l \cdot \tan(\varphi)} = \frac{\frac{1}{12}l^2 \cdot \tan(\varphi)}{h_S} = \frac{l^3 \cdot \tan(\varphi)}{12 \cdot S} \quad (4.15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_P &= \frac{S_{\text{obd}} \cdot y_{\text{obd}} + S_{\Delta} \cdot y_{\Delta}}{S_{\text{obd}} + S_{\Delta}} = \frac{S_{\text{obd}} \cdot \frac{1}{2}h_P + S_{\Delta} \cdot \left(h_P + \frac{1}{3}l \cdot \tan(\varphi)\right)}{S_{\text{obd}} + S_{\Delta}} = \\ &= \frac{l \cdot h_P \cdot \frac{1}{2}h_P + \frac{1}{2}l^2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \left(h_P + \frac{1}{3}l \cdot \tan(\varphi)\right)}{l \cdot h_P + \frac{1}{2}l^2 \cdot \tan(\varphi)} = \frac{\frac{1}{2}l \cdot h_P^2 + \frac{1}{2}l^2 \cdot h_P \cdot \tan(\varphi) + \frac{1}{6}l^3 \cdot \tan^2(\varphi)}{l \cdot \left(h_S - \frac{1}{2}l \cdot \tan(\varphi)\right) + \frac{1}{2}l^2 \cdot \tan(\varphi)} = \\ &= \frac{\frac{3 \cdot h_P^2 + 3 \cdot l \cdot h_P \cdot \tan(\varphi) + l^2 \cdot \tan^2(\varphi)}{6}}{h_S} = \frac{3 \cdot h_P^2 + 3 \cdot l \cdot h_P \cdot \tan(\varphi) + l^2 \cdot \tan^2(\varphi)}{6 \cdot h_S} \\ &= \frac{3 \cdot \left(h_S - \frac{1}{2}l \cdot \tan(\varphi)\right)^2 + 3 \cdot l \cdot \left(h_S - \frac{1}{2}l \cdot \tan(\varphi)\right) \cdot \tan(\varphi) + l^2 \cdot \tan^2(\varphi)}{6 \cdot h_S} = \\ &= \frac{3 \cdot \left(h_S^2 - h_S \cdot l \cdot \tan(\varphi) + \frac{1}{4}l^2 \cdot \tan^2(\varphi)\right) + 3 \cdot l \cdot h_S \cdot \tan(\varphi) - \frac{3}{2}l^2 \cdot \tan^2(\varphi) + l^2 \cdot \tan^2(\varphi)}{6 \cdot h_S} = \\ &= \frac{3 \cdot h_S^2 - 3 \cdot h_S \cdot l \cdot \tan(\varphi) + \frac{3}{4}l^2 \cdot \tan^2(\varphi) + 3 \cdot l \cdot h_S \cdot \tan(\varphi) - \frac{3}{2}l^2 \cdot \tan^2(\varphi) + l^2 \cdot \tan^2(\varphi)}{6 \cdot h_S} = \\ &= \frac{3 \cdot h_S^2 + \frac{1}{4}l^2 \cdot \tan^2(\varphi)}{6 \cdot h_S} = \frac{\frac{12 \cdot h_S^2 + l^2 \cdot \tan^2(\varphi)}{4}}{6 \cdot h_S} = \frac{12 \cdot h_S^2 + l^2 \cdot \tan^2(\varphi)}{24 \cdot h_S} = l \cdot \frac{12 \cdot h_S^2 + l^2 \cdot \tan^2(\varphi)}{24 \cdot S} \quad (4.16) \end{aligned}$$

Jak již bylo výše zmíněno, konec první fáze nastává v momentu, kdy dojde k potopení pravého horního rohu plováku. Tento stav nastane při úhlu  $\varphi_1$ , který se vypočítá dle vztahu (4.17), odvozeného z (4.11), kde se  $h_n$  položí rovno nule, s použitím (4.12) tedy:

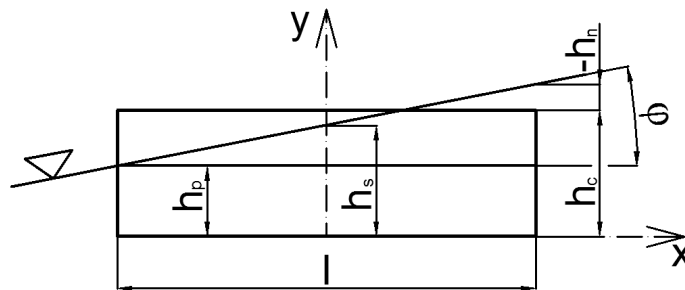
$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \arctg\left(\frac{(h_c - h_s)}{\frac{1}{2}l}\right) = \arctg\left(\frac{(h_c - \frac{S}{l})}{\frac{1}{2}l}\right) = \arctg\left(\frac{2 \cdot (l \cdot h_c - S)}{l^2}\right) = \\ &= \arctg\left(\frac{2 \cdot (4,03 \cdot 1,17 - 2,954)}{4,03l^2}\right) \cong 12,2^\circ \quad (4.17) \end{aligned}$$

Z předešlého výpočtu vyplývá, že se pravý horní roh plováku potopí při náklonu zhruba  $\varphi_1 = 12,2^\circ$ . Alternativní možnost je případ, kdy místo k potopení pravého horního

rohu dojde k vynoření levého dolního rohu. Analogicky z (4.17) lze odvodit vztah pro tento případ z (4.10), kdy se  $h_p$  položí rovno nule. Tento výpočet zde nebude proveden, jen uvedu, že k vynoření levého dolního rohu by došlo při náklonu přibližně  $20^\circ$ . Pokud by tento úhel byl nižší než dle (4.17), byl by následující postup výpočtu odlišný.

## 2. fáze:

Začíná po skončení 1. fáze, tedy v momentě, kdy se potopí pravý horní roh plováku při úhlu  $\varphi = \varphi_1$  a končí ve chvíli, kdy se vynoří levý dolní roh při sklonu  $\varphi = \varphi_2$  viz obr. 4.7. Postup bude analogický s předešlou fází. Nejprve tedy opět vztah pro velikost potopené plochy  $S$  (4.18) a pro dílčí vzdálenosti  $h_p$  (4.19) a  $h_s$  (4.20) se stejným významem jako v předešlém případě.



Obr. 4.7 - Určení těžiště ponořené plochy 2. fáze příčné stability

$$S = h_c \cdot l - \frac{(h_c - h_p)^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} \quad (4.18)$$

Vztah (4.18) pro velikost ponořené plochy  $S$  je odvozen jako velikost plochy celého plováku (4.21), od kterého se odečítá plocha nepotopené trojúhelníkové části (4.22). Dále vztah pro velikost  $h_p$  (4.19) dle obr. 4.7.

$$h_p = h_s - \frac{1}{2} \cdot l \cdot \tan(\varphi) \quad (4.19)$$

Z (4.18) po dosazení z (4.19) vztah pro  $h_s$  (4.20).

$$\begin{aligned} (h_c \cdot l - S) \cdot 2 \cdot \tan(\varphi) &= (h_c - h_p)^2 \Rightarrow h_p = h_c - \sqrt{2 \cdot (h_c \cdot l - S) \cdot \tan(\varphi)} \Rightarrow \\ \Rightarrow h_s &= h_c - \sqrt{2 \cdot (h_c \cdot l - S) \cdot \tan(\varphi)} + \frac{1}{2} \cdot l \cdot \tan(\varphi) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Následně pokračujeme odvozením vztahu pro souřadnice těžiště ponořené plochy. Postup je obdobný jako ve fázi 1. Nejprve opět velikosti jednotlivých ploch.

$$S_{\text{obd}} = h_c \cdot l \quad (4.21)$$

$$S_{\Delta} = \frac{(h_c - h_p)^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} \quad (4.22)$$

Nyní však místo sčítání dvou potopených ploch, obdélníkové a trojúhelníkové, odečítáme od celé plochy plováku, nepotopenou trojúhelníkovou část. Opět s využitím vztahů (1.20), (1.21), předešlých (4.18) až (4.22) a již výše zmíněné polohy těžišť trojúhelníku a obdélníku lze odvodit po úpravě (4.23) a (4.24).

$$\begin{aligned} x_P &= \frac{S_{\text{obd}} \cdot x_{\text{obd}} - S_{\Delta} \cdot x_{\Delta}}{S_{\text{obd}} - S_{\Delta}} = \frac{\frac{(h_c - h_p)^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} \cdot \left( -\frac{1}{2} \cdot l + \frac{h_c - h_p}{3 \cdot \tan(\varphi)} \right)}{h_c \cdot l - \frac{(h_c - h_p)^2}{2 \cdot \tan(\varphi)}} = \frac{\frac{(h_c - h_p)^2 \cdot l}{4 \cdot \tan(\varphi)} - \frac{(h_c - h_p)^3}{6 \cdot \tan^2(\varphi)}}{S} = \\ &= \frac{\frac{(h_c \cdot l - S) \cdot l}{2} - \frac{(h_c \cdot l - S) \cdot (h_c - h_p)}{3 \cdot \tan(\varphi)}}{S} = \frac{3 \cdot (h_c \cdot l^2 - S \cdot l) \cdot \tan(\varphi) - 2 \cdot h_c^2 \cdot l + 2 \cdot h_c \cdot h_p \cdot l + 2 \cdot S \cdot h_c - 2 \cdot S \cdot h_p}{6 \cdot \tan(\varphi)} = \\ &= \frac{3 \cdot h_c \cdot l^2 \cdot \tan(\varphi) - 3 \cdot S \cdot l \cdot \tan(\varphi) - 2 \cdot h_c^2 \cdot l + 2 \cdot h_c \cdot h_p \cdot l - h_c \cdot l^2 \cdot \tan(\varphi) + 2 \cdot S \cdot h_c - 2 \cdot S \cdot h_p + S \cdot l \cdot \tan(\varphi)}{6 \cdot S \cdot \tan(\varphi)} = \\ &= \frac{-h_c^2 \cdot l + h_c \cdot h_p \cdot l + h_c \cdot l^2 \cdot \tan(\varphi) + S \cdot h_c - S \cdot h_p + S \cdot l \cdot \tan(\varphi)}{3 \cdot S \cdot \tan(\varphi)} = \frac{(h_c - h_p - l \cdot \tan(\varphi)) \cdot (-h_c \cdot l + S)}{3 \cdot S \cdot \tan(\varphi)} \quad (4.23) \end{aligned}$$

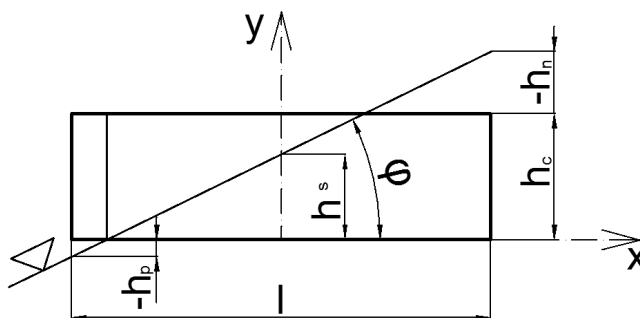
$$\begin{aligned} y_P &= \frac{S_{\text{obd}} \cdot y_{\text{obd}} - S_{\Delta} \cdot y_{\Delta}}{S_{\text{obd}} - S_{\Delta}} = \frac{l \cdot h_c \cdot \frac{h_c}{2} - \frac{(h_c - h_p)^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} \cdot \left( h_c - \frac{1}{3} (h_c - h_p) \right)}{l \cdot h_c - \frac{(h_c - h_p)^2}{2 \cdot \tan(\varphi)}} = \frac{\frac{1}{2} h_c^2 \cdot l - \frac{(h_c - h_p)^2 \cdot h_c}{2 \cdot \tan(\varphi)} + \frac{(h_c - h_p)^3}{6 \cdot \tan(\varphi)}}{S} = \\ &= \frac{\frac{1}{2} h_c^2 \cdot l - (h_c \cdot l - S) \cdot h_c + \frac{(h_c \cdot l - S)}{3} (h_c - h_p)}{S} = \frac{3 \cdot h_c^2 \cdot l - 6 \cdot h_c (h_c \cdot l - S) + h_c \cdot l - S \cdot (h_c - h_p)}{6 \cdot S} = \\ &= \frac{-h_c^2 \cdot l + 4 \cdot h_c \cdot S - 2 \cdot h_c \cdot h_p \cdot l + 2 \cdot h_p \cdot S}{6 \cdot S} = \frac{-h_c^2 \cdot l + 4 \cdot h_c \cdot S - 2 \cdot h_c \cdot h_p \cdot l + h_c \cdot l^2 \cdot \tan(\varphi) + 2 \cdot h_p \cdot S - S \cdot l \cdot \tan(\varphi)}{6 \cdot S} = \\ &= \frac{h_c \cdot (-h_c \cdot l + 4 \cdot S - 2 \cdot h_p \cdot l + l^2 \cdot \tan(\varphi)) + S \cdot (2 \cdot h_p - l \cdot \tan(\varphi))}{6 \cdot S} \quad (4.24) \end{aligned}$$

Vztah pro přesný úhel naklonění plováku, při němž dojde k vynoření jeho levého dolního rohu, můžeme zjistit ze vztahu (4.20) položením  $h_p$  rovno nule, viz (4.25). 2. fáze tedy končí při náklonu přibližně  $\varphi_2 = 21,2^\circ$ .

$$\begin{aligned} 0 &= h_c - \sqrt{2 \cdot (h_c \cdot l - S) \cdot \tan(\varphi_2)} \Rightarrow h_c^2 = 2 \cdot (h_c \cdot l - S) \cdot \tan(\varphi_2) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \varphi_2 = \arctg\left(\frac{h_c^2}{2 \cdot (h_c \cdot l - S)}\right) = \arctg\left(\frac{1,17^2}{2 \cdot (1,17 \cdot 4,03 - 2,954)}\right) \cong 21,2^\circ \quad (4.25) \end{aligned}$$

### 3. fáze:

Nastává ihned po skončení 2. fáze, tedy při úhlu naklonění  $\varphi = \varphi_2$ , kdy se vynoří levý dolní roh a končí při převrnutí plováku v úhlu  $\varphi = \varphi_p$ . Postup opět analogický, tedy z obr. 4.8., na kterém je znázorněno rozdělení plochy plováku na obdélníkovou část a na nepotopenou trojúhelníkovou část, odvodíme následující vztahy. Nejprve vztah pro potopenou plochu  $S$  (4.26) odečtením trojúhelníkové plochy (4.28) od obdélníkové (4.29) a posléze pro výšku průsečíku hladiny s osou plováku  $h_s$  (4.27) z předešlého vztahu (4.26).



Obr. 4.8 - Určení těžiště ponořené plochy 3. fáze příčné stability

$$S = h_c \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot l + \frac{h_s}{\tan(\varphi)} \right) - \frac{h_c^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} = h_c \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot l + \frac{h_s}{\tan(\varphi)} - \frac{h_c}{2 \cdot \tan(\varphi)} \right) \quad (4.26)$$

$$S = \frac{1}{2} \cdot h_c \cdot l + \frac{h_c \cdot h_s}{\tan(\varphi)} - \frac{h_c^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} \Rightarrow h_s = \frac{S \cdot \tan(\varphi)}{h_c} + \frac{1}{2} \cdot h_c - \frac{1}{2} \cdot l \cdot \tan(\varphi) \quad (4.27)$$

Pro výpočet těžiště ponořené plochy je třeba znát plochy obdélníku a trojúhelníku viz obr. 4.8, jedná se o vztahy (4.28) a (4.29).

$$S_{\text{obd}} = h_c \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot l + \frac{h_s}{\tan(\varphi)} \right) \quad (4.28)$$

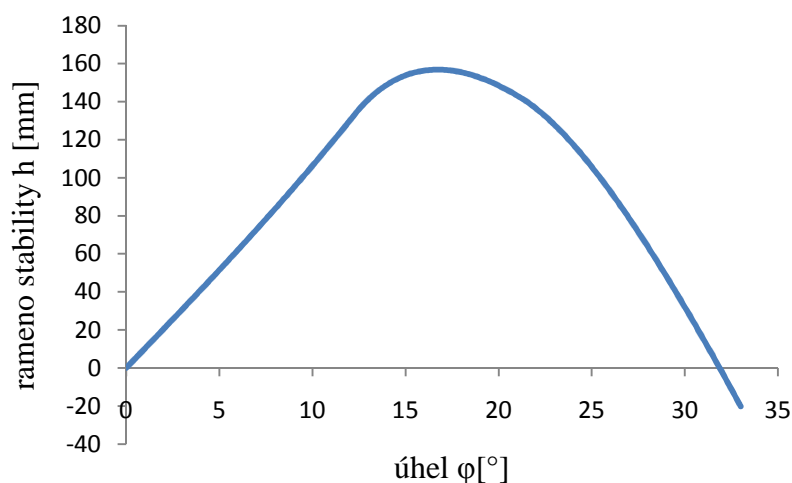
$$S_{\Delta} = \frac{h_c^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} \quad (4.29)$$

Postupujeme opět dle (1.20), (1.21) s využitím (4.26) až (4.29) a opět výše zmíněných pravidel o polohách těžišť trojúhelníku a obdélníku. Stejně jako ve fázi 2. odečítáme trojúhelníkovou plochu od obdélníkové, nyní však nikoli plochy celého plováku, ale zmenšené o plochu neponořeného obdélníku u levého okraje plováku znázorněného na obr. 4.8.

$$\begin{aligned}
x_P &= \frac{S_{\text{obd}} \cdot x_{\text{obd}} - S_{\Delta} \cdot x_{\Delta}}{S_{\text{obd}} - S_{\Delta}} = \frac{h_c \cdot \left(\frac{1}{2}l + \frac{h_s}{\tan(\varphi)}\right) \cdot \left(\frac{\frac{1}{2}l + \frac{h_s}{\tan(\varphi)}}{2} - \frac{h_s}{\tan(\varphi)}\right) - \frac{h_c^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} \cdot \left(\frac{h_c}{3 \cdot \tan(\varphi)} - \frac{h_s}{\tan(\varphi)}\right)}{h_c \cdot \left(\frac{1}{2}l + \frac{h_s}{\tan(\varphi)}\right) - \frac{h_c^2}{2 \cdot \tan(\varphi)}} = \\
&= \frac{h_c \cdot \left(\frac{1}{2}l + \frac{h_s}{\tan(\varphi)}\right) \cdot \left(\frac{l \cdot \tan(\varphi) - 2 \cdot h_s}{4 \cdot \tan(\varphi)}\right) - \frac{h_c^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} \cdot \left(\frac{h_c}{3 \cdot \tan(\varphi)} - \frac{h_s}{\tan(\varphi)}\right)}{S} = \\
&= \frac{\frac{h_c \cdot l^2}{8} - \frac{h_c \cdot h_s^2}{2 \cdot \tan^2(\varphi)} - \frac{h_c^3}{6 \cdot \tan^2(\varphi)} + \frac{h_c^2 \cdot h_s}{2 \cdot \tan^2(\varphi)}}{S} = \frac{h_c \cdot (3 \cdot l^2 \cdot \tan^2(\varphi) - 12 \cdot h_s^2 - 4 \cdot h_c^2 + 12 \cdot h_c \cdot h_s)}{24 \cdot S \cdot \tan^2(\varphi)} \quad (4.30)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_P &= \frac{S_{\text{obd}} \cdot y_{\text{obd}} - S_{\Delta} \cdot y_{\Delta}}{S_{\text{obd}} - S_{\Delta}} = \frac{h_c \cdot \left(\frac{1}{2}l + \frac{h_s}{\tan(\varphi)}\right) \cdot \frac{h_c}{2} - \frac{h_c^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} \cdot \frac{2}{3} h_c}{h_c \cdot \left(\frac{1}{2}l + \frac{h_s}{\tan(\varphi)}\right) - \frac{h_c^2}{2 \cdot \tan(\varphi)}} = \frac{\frac{h_c^2 \cdot l}{4} + \frac{h_c^2 \cdot h_s}{2 \cdot \tan(\varphi)} - \frac{2 \cdot h_c^3}{6 \cdot \tan(\varphi)}}{S} = \\
&= \frac{h_c^2 \cdot (3 \cdot l \cdot \tan(\varphi) + 6 \cdot h_s - 4 \cdot h_c)}{12 \cdot S \cdot \tan(\varphi)} \quad (4.31)
\end{aligned}$$

Nyní konečně, po odvození vztahů pro polohu těžiště ponořené plochy plováku ve všech fázích naklápění, můžeme sestavit Reedův diagram, znázorněný na obr. 4.9. Vykreslení bylo provedeno v programu Microsoft Excel dosazením za  $x_P$ ,  $y_P$  a  $h_g$  pro danou fázi do vztahu (3.7) a následnou tabelací. Tabele byla provedena pro úhly náklonu  $\varphi=0^\circ$  až  $\varphi=33^\circ$  s krokem  $0,1^\circ$ .



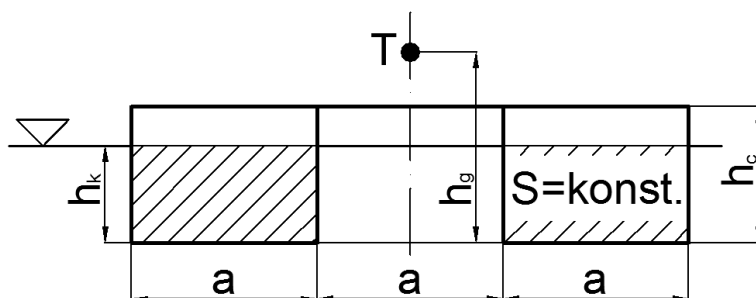
Obr. 4.9 - Reedův diagram pro příčnou stabilitu

Z grafu na obr. 4.9 a vytabelovaných hodnot lze vyčíst, že k převrnutí otoče dojde při úhlu  $\varphi_p=31,9^\circ$ . Maximální rameno stability má pak hodnotu  $h_{\text{max}}=156,9\text{mm}$  a je ho dosaženo při úhlu naklonění  $\varphi=16,7^\circ$ .



## 4.2 Podélná stabilita plovoucí otoče

Postup stanovení podélné stability plovoucí otoče bude shodný jako u příčné stability. Nejprve tedy náčrt plováků v daném směru pro rovnovážný stav znázorněný na obr. 4.9. Rozměry jsou shodné jako v předešlé kapitole, tedy šířka obou plováků a spojovací konstrukce  $a=1,6\text{m}$ , výška plováku  $h_c=1,17\text{m}$ , těžiště otoče je vy výšce  $h_g=1,629\text{m}$  (4.1), délka plováků pak je  $l=4,03\text{m}$  viz [6]. V rovnovážném stavu je celá otoč ponořena do hloubky  $h_k=0,733\text{m}$  (4.7).



Obr. 4.9 - Rozměry plovoucí otoče pro rovnovážný stav podélné stability

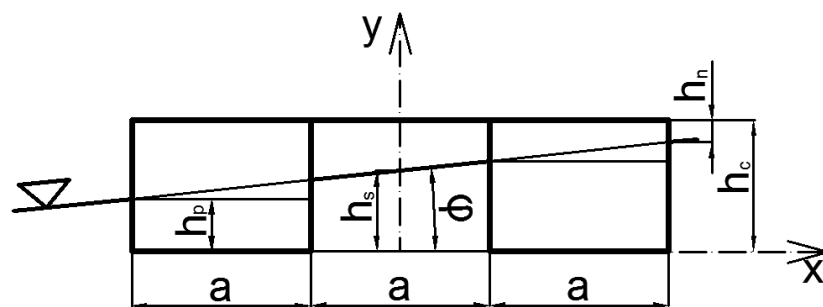
Samozřejmě i pro podélnou stabilitu musí být velikost ponořeného objemu stále konstantní  $O=9,454\text{m}^3$  (4.5). Z toho vyplývá, že lze určit velikost ponořené svislé plochy dle (4.32).

$$S = \frac{O}{l} = \frac{9,454}{4,03} = 2,346\text{m}^2 \quad (4.32)$$

Naším cílem je opět dle (3.7) sestavit Reedův diagram, proto pokračujeme odvozením vztahů pro polohy těžišť ponořených ploch jednotlivých fází naklápění.

### 1. fáze:

Začíná rovnovážným stavem, kdy úhel naklonění  $\varphi=0^\circ$  a končí pro úhel  $\varphi=\varphi_1$ , kdy dojde k potopení pravého horního rohu pravého plováku. Na obr. 4.10 je vykreslena tato fáze, opět jsou zde použity dílčí délky  $h_p$ ,  $h_s$  a  $h_n$  se stejným významem jako u příčné stability.



Obr. 4.10 - Určení těžiště ponořené plochy 1. fáze podélné stability

Z vlastností lichoběžníku vyplývá vztah pro velikost ponořené  $S$  lichoběžníkové plochy (4.33).

$$S = 2 \cdot a \cdot h_s \quad (4.33)$$

A nyní z geometrických poměrů dle obr. 4.10 vztahy (4.34) a (4.35), pro délky  $h_p$ ,  $h_n$ .

$$h_p = h_s - \frac{3}{2} \cdot a \cdot \tan(\varphi) \quad (4.34)$$

$$h_n = h_c - h_s - \frac{3}{2} \cdot a \cdot \tan(\varphi) \quad (4.35)$$

Pokračujeme rozdělením potopené plochy obou plováků na vhodné geometrické útvary. V tomto případě jsou to dle obr. 4.10 vždy jeden obdélník a jeden trojúhelník pro každý z plováků. Jejich plochy jsou viz (4.36) až (4.39), index 1 vždy přísluší levému plováku, index 2 pak pravému.

$$S_{\text{obd1}} = a \cdot \left( h_s - \frac{3}{2} \cdot a \cdot \tan(\varphi) \right) \quad (4.36)$$

$$S_{\Delta 1} = \frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot \tan(\varphi) \quad (4.37)$$

$$S_{\text{obd2}} = a \cdot \left( h_s + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \tan(\varphi) \right) \quad (4.38)$$

$$S_{\Delta 2} = \frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot \tan(\varphi) \quad (4.39)$$

Výpočet polohy těžiště ponořené plochy určíme dle vztahů (1.20),(1.21),(4.32) a (4.36) až (4.39). Dále použijeme již zmíněné vlastnosti polohy těžiště trojúhelníku a obdélníku.

$$\begin{aligned}
x_P &= \frac{S_{obd1} \cdot x_{obd1} + S_{\Delta 1} \cdot x_{\Delta 1} + S_{obd2} \cdot x_{obd2} + S_{\Delta 2} \cdot x_{\Delta 2}}{S_{obd1} + S_{\Delta 1} + S_{obd2} + S_{\Delta 2}} = \\
&= \frac{a \cdot \left( h_s - \frac{3}{2} a \cdot \tan(\varphi) \right) \cdot (-a) + \frac{1}{2} a^2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \left( -\frac{5}{6} a \right) + a \cdot \left( h_s + \frac{1}{2} a \cdot \tan(\varphi) \right) \cdot a + \frac{1}{2} a^2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \frac{7}{6} a}{S} = \\
&= \frac{-a^2 \cdot h_s + \frac{3}{2} a^3 \cdot \tan(\varphi) - \frac{5}{12} a^3 \cdot \tan(\varphi) + a^2 \cdot h_s + \frac{1}{2} a^3 \cdot \tan(\varphi) + \frac{7}{12} a^3 \cdot \tan(\varphi)}{S} = \frac{13 \cdot a^3 \cdot \tan(\varphi)}{6 \cdot S} \quad (4.40)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_P &= \frac{S_{obd1} \cdot y_{obd1} + S_{\Delta 1} \cdot y_{\Delta 1} + S_{obd2} \cdot y_{obd2} + S_{\Delta 2} \cdot y_{\Delta 2}}{S_{obd1} + S_{\Delta 1} + S_{obd2} + S_{\Delta 2}} = \\
&= \frac{a \cdot \left( h_s - \frac{3}{2} a \cdot \tan(\varphi) \right) \cdot \frac{1}{2} \left( h_s - \frac{3}{2} a \cdot \tan(\varphi) \right) + \frac{1}{2} a^2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \left( h_s - \frac{7}{6} a \cdot \tan(\varphi) \right) + a \cdot \left( h_s + \frac{1}{2} a \cdot \tan(\varphi) \right) \cdot \frac{1}{2} \left( h_s + \frac{1}{2} a \cdot \tan(\varphi) \right)}{S} + \\
&\quad + \frac{\frac{1}{2} a^2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \left( h_s - \frac{7}{6} a \cdot \tan(\varphi) \right)}{S} = \\
&= \frac{\left( \frac{1}{2} a \cdot h_s - \frac{3}{4} a^2 \cdot \tan(\varphi) \right) \cdot \left( h_s - \frac{3}{2} a \cdot \tan(\varphi) \right) + \frac{1}{2} a^2 \cdot h_s \cdot \tan(\varphi) - \frac{7}{12} a^3 \cdot \tan^2(\varphi)}{S} + \\
&\quad + \frac{\left( \frac{1}{2} a \cdot h_s + \frac{1}{4} a^2 \cdot \tan(\varphi) \right) \cdot \left( h_s + \frac{1}{2} a \cdot \tan(\varphi) \right) + \frac{1}{2} a^2 \cdot h_s \cdot \tan(\varphi) + \frac{5}{12} a^3 \cdot \tan^2(\varphi)}{S} = \\
&= \frac{\frac{13}{12} a^3 \cdot \tan^2(\varphi) + a \cdot h_s^2}{S} = \frac{13 \cdot a^4 \cdot \tan^2(\varphi) + 3 \cdot S^2}{12 \cdot a \cdot S} \quad (4.41)
\end{aligned}$$

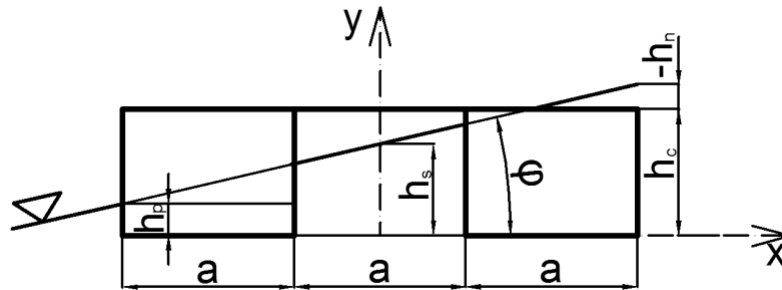
Jak již bylo výše zmíněno, první fáze podélného naklápění končí v momentě ponoření pravé horní hrany pravého plováku. O jaký úhel  $\varphi$  se konkrétně jedná můžeme zjistit, pokud v rovnici (4.35) položíme  $h_n$  rovno nule. S použitím (4.33) je tedy úhel  $\varphi_1$ :

$$\begin{aligned}
0 &= h_c - h_s - \frac{3}{2} \cdot a \cdot \tan(\varphi_1) \Rightarrow \frac{3}{2} \cdot a \cdot \tan(\varphi) = h_c - \frac{S}{2 \cdot a} \Rightarrow \\
\Rightarrow \varphi_1 &= \arctg\left(\frac{2 \cdot \left( h_c - \frac{S}{2 \cdot a} \right)}{3 \cdot a}\right) = \arctg\left(\frac{2 \cdot \left( 1,17 - \frac{2,346}{2 \cdot 1,6} \right)}{3 \cdot 1,6}\right) \cong 10,3^\circ \quad (4.42)
\end{aligned}$$

Z předešlého výpočtu tedy vyplývá, že k potopení pravého horního rohu pravého plováku dojde přibližně při úhlu  $\varphi_1 = 10,3^\circ$ . Stejně jako u příčné stability je i zde druhá možnost a to, že se vynoří jako první levý dolní roh levého plováku. Výpočet úhlu, při kterém by tato situace nastala, je obdobný jako pro vztah (4.42), do vztahu (4.34) dosadíme za  $h_p$  rovno nule a vyjádříme úhel  $\varphi$ . Tento výpočet zde opět nebude proveden jen uvedu, že k této situaci by došlo až při úhlu  $\varphi = 26^\circ$ , z čehož vyplývá, že postup zde uvedený je správný.

## 2. fáze:

Tato fáze začíná zanořením pravého horního rohu pravého plováku při úhlu naklonění  $\varphi = \varphi_1$  a končí v momentě ponoření levého horního rohu pravého plováku v úhlu  $\varphi = \varphi_2$ .



Obr. 4.11 - Určení těžiště ponořené plochy 2. fáze podélné stability

Nejprve tedy opět velikost ponořené plochy  $S$  (4.43) a vzdálenost  $h_n$  (4.44), oboje dle obr. 4.11.

$$S = 2 \cdot a \cdot h_s - \frac{(-h_n)^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} \quad (4.43)$$

$$-h_n = h_s + \frac{3}{2} \cdot a \cdot \tan(\varphi) - h_c \quad (4.44)$$

Nyní se pokusíme vyjádřit  $h_s$  dosazením (4.44) do (4.43). Tímto krokem nám vznikne kvadratická rovnice, v jejímž závěru při určování, který ze dvou kořenů je správný, volíme ten menší (tedy v obecně známém vztahu pro řešení kvadratické rovnice za  $\pm$  dosadíme  $-$ ). Toto rozhodnutí bylo provedeno po porovnání výsledku se vztahem (4.44) a uvážení faktu, že v této fázi naklápění musí být výška  $-h_n \leq a \cdot \tan(\varphi)$ , tato operace byla provedena v předposledním kroku odvozování.

$$(-h_n)^2 - 4 \cdot a \cdot h_s \cdot \tan(\varphi) - 2 \cdot S \cdot \tan(\varphi) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h_s^2 + 3 \cdot h_s \cdot a \cdot \tan(\varphi) - 2 \cdot h_s \cdot h_c - 3 \cdot h_c \cdot a \cdot \tan(\varphi) + \frac{9}{4} \cdot a^2 \cdot \tan^2(\varphi) + h_c^2 - 4 \cdot a \cdot$$

$$\cdot h_s \cdot \tan(\varphi) - 2 \cdot S \cdot \tan(\varphi) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h_s^2 + (-a \cdot \tan(\varphi) - 2 \cdot h_c) \cdot h_s - 3 \cdot h_c \cdot a \cdot \tan(\varphi) + \frac{9}{4} \cdot a^2 \cdot \tan^2(\varphi) + h_c^2 - 2 \cdot S \cdot$$

$$\cdot \tan(\varphi) = 0 \Rightarrow$$

$$h_{s1,2} = \frac{2 \cdot h_c + a \cdot \tan(\varphi) \pm \sqrt{-8 \cdot a^2 \cdot \tan^2(\varphi) + 16 \cdot h_c \cdot a \cdot \tan(\varphi) - 8 \cdot S \cdot \tan(\varphi)}}{2} =$$

$$= h_c + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \tan(\varphi) \pm \sqrt{4 \cdot a^2 \cdot \tan^2(\varphi) \cdot \left( \frac{h_c}{a \cdot \tan(\varphi)} - \frac{S}{2 \cdot a^2 \cdot \tan(\varphi)} - \frac{1}{2} \right)}$$

$$h_s = h_c - \frac{3}{2} \cdot a \cdot \tan(\varphi) + 2 \cdot a \cdot \tan(\varphi) \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{h_c}{a \cdot \tan(\varphi)} - \frac{S}{2 \cdot a^2 \cdot \tan(\varphi)} - \frac{1}{2}} \right) \quad (4.45)$$

Nyní můžeme přejít k výpočtu těžiště ponořené plochy. Pro tuto fázi by však již výsledný vztah byl natolik složitý, že raději volíme postup, kdy jej rozložíme na jednodušší dílčí vztahy, takzvané statické momenty ploch. Pro každou z ploch jsou uvedeny dva statické momenty ke každé z os, liší se indexem, pro x-ovou osu tedy index x pro y-ovou y. Nejprve tedy statické momenty celé plochy pravého plováku (4.46), (4.47).

$$M_{1x} = h_c \cdot a^2 \quad (4.46)$$

$$M_{1y} = \frac{1}{2} \cdot h_c^2 \cdot a \quad (4.47)$$

Dále statické momenty neponořené trojúhelníkové části pravého plováku u jeho levého horního rohu. (4.48), (4.49).

$$M_{2x} = \frac{1}{2} \cdot \left( a - \frac{-h_n}{\tan(\varphi)} \right)^2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot a + \frac{1}{3} \cdot \left( a - \frac{-h_n}{\tan(\varphi)} \right) \right] \quad (4.48)$$

$$M_{2y} = \frac{1}{2} \cdot \left( a - \frac{-h_n}{\tan(\varphi)} \right)^2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \left[ h_c - \frac{1}{3} \cdot (a \cdot \tan(\varphi) + h_n) \right] \quad (4.49)$$

Pokračujeme statickými momenty ponořené plochy obdélníkového tvaru levého plováku (4.50), (4.51).

$$M_{3x} = h_p \cdot a^2 \quad (4.50)$$

$$M_{3y} = \frac{1}{2} \cdot h_p^2 \cdot a \quad (4.51)$$

Následně statické momenty trojúhelníkové ponořené plochy levého plováku (4.52), (4.53).

$$M_{4x} = \frac{5}{12} \cdot a^3 \cdot \tan(\varphi) \quad (4.52)$$

$$M_{4y} = \frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \left( h_p + \frac{1}{3} \cdot a \cdot \tan(\varphi) \right) \quad (4.53)$$

Po vyjádření statických momentů všech ploch k oběma osám můžeme vypočítat souřadnice těžiště ponořené plochy dle vztahů (4.54) a (4.55)

$$x_p = \frac{M_{1x} - M_{2x} - M_{3x} - M_{4x}}{S} \quad (4.54)$$

$$y_p = \frac{M_{1y} - M_{2y} + M_{3y} + M_{4y}}{S} \quad (4.55)$$

Jak bylo zmíněno v úvodu této fáze, její konec nastane v momentu potopení levého horního rohu pravého plováku, při úhlu  $\varphi = \varphi_2$ . Je zřejmé, že tato situace nastane v případě, když platí rovnice (4.56). Po dosazení do (4.56) z (4.44), (4.45) a úpravě lze odvodit vztah (4.57) pro velikost úhlu  $\varphi_2$ .

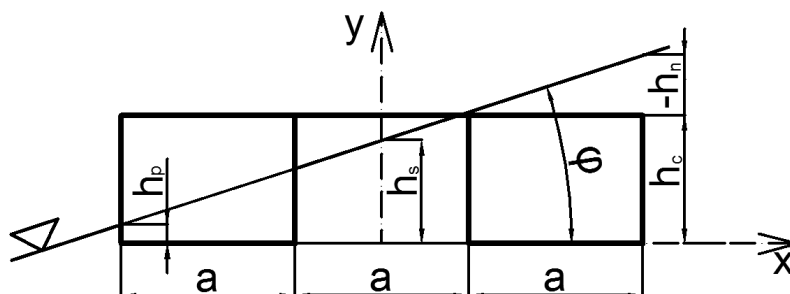
$$-h_n = a \cdot \tan(\varphi_2) \quad (4.56)$$

$$\begin{aligned} h_s + \frac{3}{2} \cdot a \cdot \tan(\varphi_2) - h_c &= a \cdot \tan(\varphi_2) \\ \Rightarrow 2 \cdot a \cdot \tan(\varphi_2) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{h_c}{a \cdot \tan(\varphi_2)} - \frac{S}{2 \cdot a^2 \cdot \tan(\varphi_2)} - \frac{1}{2}}\right) &= a \cdot \tan(\varphi_2) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{1}{2} &= \sqrt{\frac{h_c}{a \cdot \tan(\varphi_2)} - \frac{S}{2 \cdot a^2 \cdot \tan(\varphi_2)} - \frac{1}{2}} \Rightarrow \frac{1}{4} = \frac{h_c}{a \cdot \tan(\varphi_2)} - \frac{S}{2 \cdot a^2 \cdot \tan(\varphi_2)} - \frac{1}{2} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{3}{4} \cdot \tan(\varphi_2) &= \frac{2 \cdot h_c \cdot a - S}{2 \cdot a^2} \Rightarrow \varphi_2 = \arctg\left(\frac{4 \cdot h_c \cdot a - 2 \cdot S}{3 \cdot a^2}\right) = \arctg\left(\frac{4 \cdot 1,17 \cdot 1,6 - 2 \cdot 2,346}{3 \cdot 1,6^2}\right) \cong 20^\circ \quad (4.57) \end{aligned}$$

Z (4.57) tedy vyplývá, že 2. fáze výpočtu podélné stability plovoucí otoče končí při úhlu náklonu  $\varphi_2 = 20^\circ$

### 3.fáze:

Začíná ponořením levého horního rohu pravého plováku (je tedy celý pod hladinou vody) při úhlu naklonění  $\varphi = \varphi_2$  a končí v momentu vynoření levé dolní hrany levého plováku v úhlu  $\varphi = \varphi_3$ . Celou situaci vystihuje obr. 4.12.



Obr. 4.12 - 3. fáze podélné stability

Jak bude posléze dokázáno, tato fáze trvá jen velmi krátkou dobu, a proto zde nebude řešena. Jako důkaz nám poslouží velikost úhlu  $\varphi_3$ . Pro odvození potřebného vztahu bude nutné nejprve znát velikost ponořené plochy  $S$  (4.58), tu určíme jako součet plochy celého ponořeného pravého plováku a zbývající trojúhelníkové plochy levého plováku pod hladinou.

$$S = a \cdot h_c + \frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot \tan(\varphi) \quad (4.58)$$

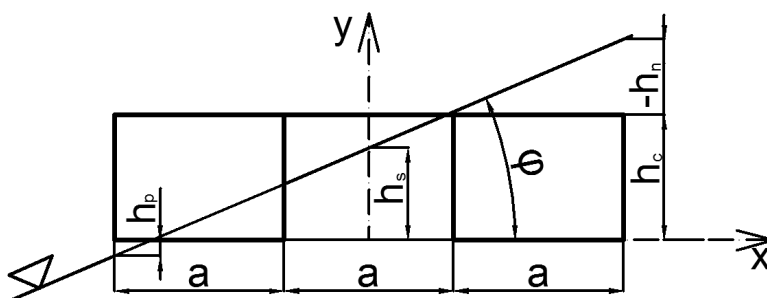
Odtud lze vyjádřit velikost úhlu  $\varphi_3$  (4.59).

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot \tan(\varphi_3) &= S - a \cdot h_c \Rightarrow \varphi_3 = \arctg\left(\frac{2 \cdot (S - a \cdot h_c)}{a^2}\right) = \\ &= \arctg\left(\frac{2 \cdot (2,346 - 1,6 \cdot 1,17)}{1,6^2}\right) \cong 20,3^\circ \end{aligned} \quad (4.59)$$

Jelikož úhel  $\varphi_2=20^\circ$  a úhel  $\varphi_3=20,3^\circ$ , řešení této fáze by postihovalo náklon o velikosti  $0,3^\circ$ . Takto malá hodnota je zcela zanedbatelná při sestřování Reedova diagramu pro podélnou stabilitu, bude tedy uvažováno, jako by po druhé fázi následovala ihned fáze čtvrtá.

#### 4.fáze:

Tato fáze začíná vynořením levé spodní hrany levého plováku v úhlu  $\varphi = \varphi_3$  a končí převrnutím otoče v úhlu  $\varphi = \varphi_p$ . Na obr. 4.13 je vidět rozdělení potopené plochy na obdélník o ploše  $S_{\text{obd}}$  (celý pravý plovák) a trojúhelník o velikosti plochy  $S_{\Delta}$  (potopená část levého plováku), nyní určíme velikosti těchto ploch (4.60),(4.61).



Obr. 4.13 - Určení těžiště ponořené plochy 4. fáze podélné stability

$$S_{\text{obd}} = a \cdot h_c \quad (4.60)$$

$$S_{\Delta} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{h_s}{\tan(\varphi)} - \frac{1}{2} \cdot a \right)^2 \cdot \tan(\varphi) \quad (4.61)$$

Celá ponořená plocha je tedy jejich součtem (4.62).

$$S = a \cdot h_c + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{h_s}{\tan(\varphi)} - \frac{1}{2} \cdot a \right)^2 \cdot \tan(\varphi) \quad (4.62)$$

Odtud pak  $h_s$  (4.63).

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{h_s}{\tan(\varphi)} - \frac{1}{2} \cdot a \right)^2 \cdot \tan(\varphi) &= S - a \cdot h_c \Rightarrow \left( \frac{h_s}{\tan(\varphi)} - \frac{1}{2} \cdot a \right)^2 = \frac{2 \cdot (S - a \cdot h_c)}{\tan(\varphi)} \Rightarrow \\ \frac{h_s}{\tan(\varphi)} &= \sqrt{\frac{2 \cdot (S - a \cdot h_c)}{\tan(\varphi)}} + \frac{1}{2} \cdot a \Rightarrow h_s = \left( \sqrt{\frac{2 \cdot (S - a \cdot h_c)}{\tan(\varphi)}} + \frac{1}{2} \cdot a \right) \cdot \tan(\varphi) \end{aligned} \quad (4.63)$$

S využitím vztahu (1.20), (1.21), (4.60) až (4.63) a pravidel o poloze těžiště trojúhelníku a obdélníku odvodíme vztahy (4.64), (4.65) pro souřadnice polohy těžiště ponořené plochy.

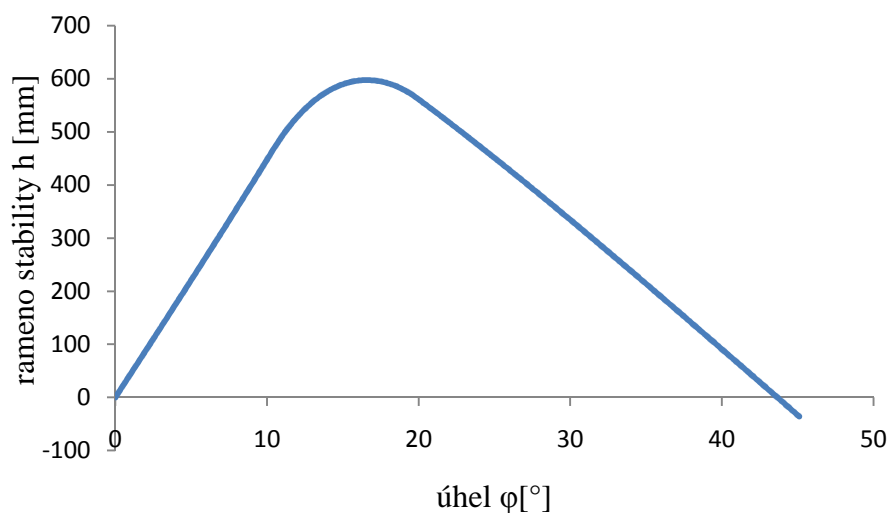
$$\begin{aligned} x_P &= \frac{S_{\text{obd}} \cdot x_{\text{obd}} + S_{\Delta} \cdot x_{\Delta}}{S_{\text{obd}} + S_{\Delta}} = \frac{a \cdot h_c \cdot a + \frac{1}{2} \left( \frac{h_s}{\tan(\varphi)} - \frac{1}{2} a \right)^2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \left[ -\frac{1}{2} a - \frac{1}{3} \left( \frac{h_s}{\tan(\varphi)} - \frac{1}{2} a \right) \right]}{S} = \\ &= \frac{h_c \cdot a^2 + \frac{1}{2} \tan(\varphi) \cdot \left( \frac{h_s^2}{\tan^2(\varphi)} - \frac{h_s \cdot a}{\tan(\varphi)} + \frac{1}{4} a^2 \right) \cdot \left( -\frac{1}{2} a - \frac{h_s}{3 \cdot \tan(\varphi)} - \frac{1}{6} a \right)}{S} = \\ &= \frac{h_c \cdot a^2 + \left( \frac{h_s^2}{2 \cdot \tan(\varphi)} - \frac{h_s \cdot a}{2} + \frac{1}{8} a^2 \tan(\varphi) \right) \cdot \left( -\frac{h_s}{3 \cdot \tan(\varphi)} - \frac{1}{3} a \right)}{S} = \\ &= \frac{h_c \cdot a^2 - \frac{h_s^3}{6 \cdot \tan^2(\varphi)} - \frac{h_s^2 \cdot a}{6 \cdot \tan(\varphi)} + \frac{h_s^2 \cdot a}{6} + \frac{h_s^2 \cdot a}{6 \cdot \tan(\varphi)} - \frac{a^3 \cdot \tan(\varphi)}{24} - \frac{a^2 \cdot h_s}{24}}{S} = \\ &= \frac{h_c \cdot a^2 - \frac{h_s^3}{6 \cdot \tan^2(\varphi)} + \frac{h_s^2 \cdot a}{6} - \frac{a^3 \cdot \tan(\varphi)}{24} - \frac{a^2 \cdot h_s}{24}}{S} \end{aligned} \quad (4.64)$$

$$\begin{aligned} y_P &= \frac{S_{\text{obd}} \cdot y_{\text{obd}} + S_{\Delta} \cdot y_{\Delta}}{S_{\text{obd}} + S_{\Delta}} = \frac{a \cdot h_c \cdot \frac{1}{2} h_c + \frac{1}{2} \left( \frac{h_s}{\tan(\varphi)} - \frac{1}{2} a \right)^2 \cdot \tan(\varphi) \cdot \left( \frac{h_s}{\tan(\varphi)} - \frac{1}{2} a \right) \cdot \tan(\varphi)}{S} = \\ &= \frac{\frac{1}{2} h_c^2 \cdot a + \frac{1}{6} \left( \frac{h_s}{\tan(\varphi)} - \frac{1}{2} a \right)^3 \cdot \tan^2(\varphi)}{S} \end{aligned} \quad (4.65)$$

Nyní můžeme konečně sestavit Reedův diagram pro podélnou stabilitu, viz obr 4.14. Stejně jako u Reedova diagramu pro příčnou stabilitu, bylo vykreslení provedeno v programu Microsoft Excel, dosazením do vztahu (3.7). Dosazena byla konstantní výška



těžiště otoče  $h_g$  a vztahy popisující souřadnice těžiště pro danou fázi. Následná tabulace byla provedena s krokem  $0,1^\circ$  pro úhly v rozmezí  $\varphi=0^\circ$  až  $\varphi=45^\circ$ .



*Obr. 4.14 - Reedův diagram pro podélnou stabilitu*

Z diagramu na obr. 4.14 a vytabelovaných hodnot vyplývá, že k převrnutí otoče kolem příčné osy dojde při úhlu  $\varphi_p=43,7^\circ$ . Maximální rameno stability je  $h_{\max}=597,9$  mm při úhlu naklonění  $\varphi=16,6^\circ$ .

## 5. Stabilita pásového dopravníku s průběžnými plováky - řešení modelováním

V této kapitole bude provedeno sestrojení Reedova diagramu pro plovoucí pásový dopravník s průběžnými plováky 2D i 3D modelováním. Pásový dopravník s průběžnými plováky kombinuje dva druhy plováků. První z nich je plovák, jež je na každé straně připevněn zesponu po celé délce pásového dopravníku. Jeho tvar je v místě připevnění obdélníkový, u dna pak půlkruhový. Tvar je znázorněn na obr. 5.1. Druhý typ je pak značně zvětšený koncový plovák, připevněný na obou stranách celého dopravníku v místech spojení s dalšími články tratě. Konstrukčně se tedy tento druh dopravníku značně liší od předešlého, využívající plovoucí otoče. Pásový dopravník s průběžnými plováky je vlastně jeden plovoucí celek, který se na svých koncích spojuje s dalšími. Z tohoto důvodu nemá smysl řešit podélnou stabilitu, protože i malé pootočení okolo příčné osy má vlivem značně větší délky než šířky plováků za následek řádově větší nárůst ramene stability, než u pootočení okolo osy podélné (příčná stabilita). Dopravník se dále skládá ze spojovací konstrukce, jejíž ponořený objem bude opět zanedbán, mechanismů zajišťujících vzájemné natočení dopravníků vůči sobě, samotného pásového dopravníku a dalších (lávka, osvětlení atd.). Je zřejmé, že tvarová složitost dopravníku činí analytický výpočet téměř nemožný, proto je vhodná metoda modelování a následně numerického výpočtu.

Všechny hodnoty, parametry, náčrty či rozměry v kapitolách 5, 5.1 a 5.2, jsou odečteny z příslušné výkresové dokumentace [7]. Nejprve byla odečtena hmotnost dopravníku  $m_c=18567,6\text{kg}$ . Tomu odpovídá tíhová síla  $G$  viz (5.1).

$$G = m_c \cdot g = 18567,6 \cdot 9,81 = 182148,2\text{N} \quad (5.1)$$

Aby byla celá konstrukce v rovnováze (plovala), musí být vztlaková síla  $F_{vz}$  rovna tíhové síle  $G$ . Dle Archimédova zákona je:

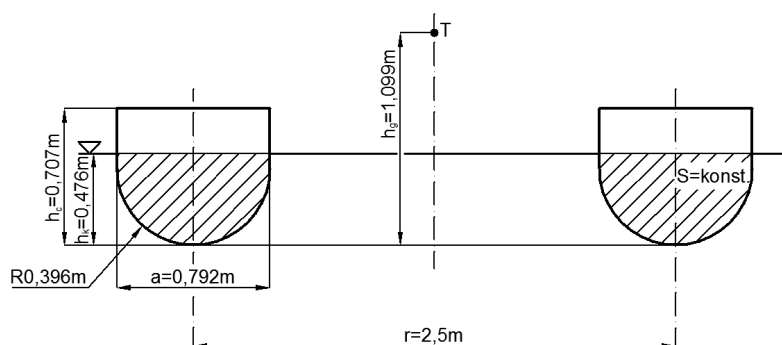
$$F_{vz} = m_k \cdot g \quad (5.2)$$

Zde  $m_k$  je hmotnost kapaliny vytlačené tělesem. Ze vztahů (5.1) a (5.2) také mimo jiné vyplývá, že pokud jsou si rovny obě výše zmíněné síly, musí také  $m_k$  být rovno  $m_c$ . Můžeme tedy vyjádřit ponořený objem tělesa  $O$  (5.3). Kde  $\rho=1000\text{kg/m}^3$  je hustota vody.

$$m_k = \rho \cdot O \Rightarrow O = \frac{m_k}{\rho} = \frac{18567,6}{1000} = 18,5676\text{m}^3 \quad (5.3)$$

## 5.1 Stabilita pásového dopravníku s průběžnými plováky - 2D modelování

Přesnost tohoto postupu je podmíněna tím, aby vyšetřovaný plovák měl v celé své délce stejný průřez. Tuto podmínku splníme pro pásový dopravník s průběžnými plováky zavedením jistého zjednodušení. Zjednodušení spočívá v zanedbání zvětšených plováků na obou koncích dopravníku a uvažováním pouze půlválcových plováků vedoucích po celé délce dopravníku. Tím se však dopustíme jisté chyby, jejíž velikost bude dále vyhodnocována. Z výkresové dokumentace [7] byl vytvořen náčrtek na obr. 5.1, který zachycuje tvar plováků a jeho rozměry v řezu příčnou osou.



Obr. 5.1 - Náčrt plováků

Dle obr. 5.1 je šířka každého z plováků  $a=0,792\text{m}$ , výška  $h_c=0,707\text{m}$ , spodní strana půlkruhového tvaru má pak rádius  $R=0,396\text{m}$ . Osy plováků jsou od sebe vzdáleny o  $r=2,5\text{m}$ . Délka plováků  $l=30\text{m}$ . Dále z výkresové dokumentace byla odečtena výška těžiště hmot plovoucího dopravníku  $h_g=1,099\text{m}$ . Chceme-li znát velikost ponořené plochy plováků z obr. 5.1, která se v průběhu naklápění nemění, musíme objem získaný z (5.3) podělit délkou plováků  $l$ , viz (5.4)

$$S = \frac{V}{l} = \frac{18,5676}{30} = 0,619\text{m}^2 \quad (5.4)$$

Nyní pokračujeme výpočtem hloubky  $h_k$ , ve které jsou za klidu ponořeny oba plováky. Výpočet provedeme jako součet ponořených ploch půlkruhu a obdélníku pro každý z plováků.

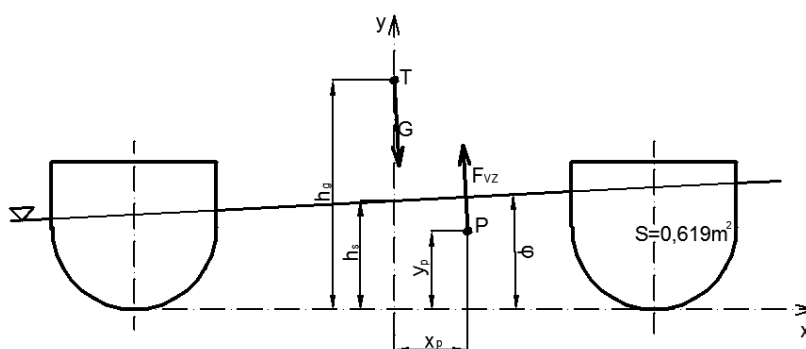
$$S = 2 \cdot \left[ \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot a^2 + a \cdot \left( h_k - \frac{1}{2} \cdot a \right) \right] \quad (5.5)$$

Odtud tedy  $h_k$ :

$$\frac{1}{2} \cdot S = \frac{1}{8} \pi \cdot a^2 + a \cdot \left( h_k - \frac{1}{2} \cdot a \right) \Rightarrow \frac{S}{2 \cdot a} - \frac{\pi \cdot a}{8} + \frac{a}{2} = h_k \Rightarrow$$

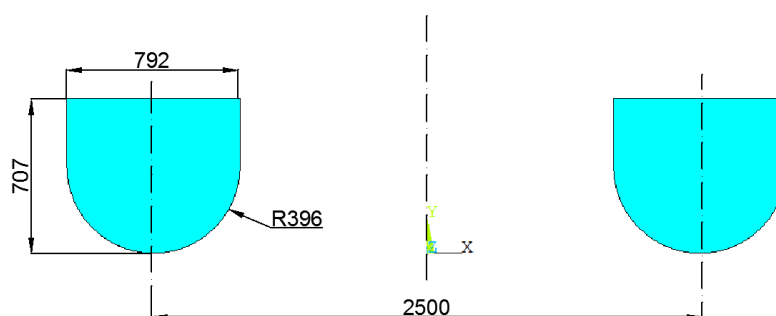
$$\Rightarrow h_k = \frac{4 \cdot S + d^2 \cdot (4 - \pi)}{8 \cdot a} = \frac{4 \cdot 0,619 + 0,792^2 \cdot (4 - \pi)}{8 \cdot 0,792} = 0,476 \text{ m} \quad (5.6)$$

Naklání plováků je znázorněno na obr. 5.2 i se zvoleným souřadným systémem. Osa y je totožná s osou symetrie plováků, osa x pak prochází jejich dnem. Stejně jako u analytického výpočtu také zde je pro jednoduchost zakreslena otáčející se vodní hladina, nikoliv plavidlo. V obrázku je také zakreslena tíhová síla G, působící v těžišti hmot T a vztlaková síla  $F_{vz}$  působící v těžišti ponořené plochy P.



Obr. 5.2 - Naklání pásového dopravníku s průběžnými plováky

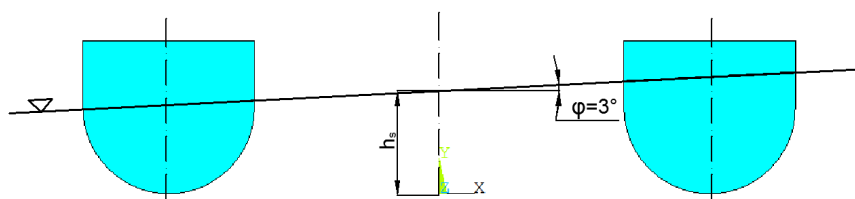
Jak již bylo výše zmíněno, cílem této části práce je vykreslení grafu závislosti ramene stability  $h$ , na úhlu naklonění  $\varphi$  (Reedův diagram), dle vztahu (3.7). K tomu je potřeba znát tři parametry, výše uvedenou konstantní výšku  $h_g$  a souřadnice polohy těžiště ponořené plochy plováků  $x_p$  a  $y_p$ , které se při naklápění mění. Výpočet těchto souřadnic bude proveden v programu Ansys. Nejprve byl vytvořen geometrický model znázorněný na obr. 5.3.



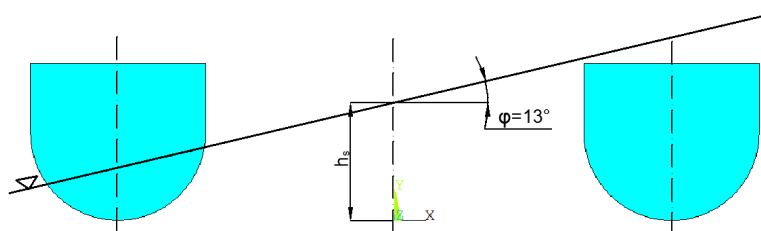
Obr. 5.3 - Geometrický 2D model průřezu plováků

Tento model byl postupně řezán pod úhly od  $\varphi=0^\circ$  s krokem  $1^\circ$  tak dlouho, dokud rameno stability dle (3.7) nekleslo pod nulu, tedy do momentu převrnutí dopravníku při úhlu  $\varphi_p$ . Nejprve bylo nutno v každém kroku zjistit výšku  $h_s$  tak, aby ponořená plocha viz (5.4) byla vždy konstantní, přesně  $S=618920\text{mm}^2$ . Toho bylo postupným opakováním výpočtu dosaženo vždy s odchylkou menší než  $1\text{mm}^2$ , což je pro tento úkol přesnost více než postačující. Následně bylo provedeno rozdělení ploch a výpočet těžiště těch pod hladinou za pomoci zabudovaných funkcí programu Ansys. Celá práce byla usnadněna použitím makra. Postup je znázorněn pro několik úhlů na obr. 5.4 až obr. 5.6. Příklad výpisu z programu Ansys pro úhel naklopení  $\varphi=5^\circ$  je níže uveden.

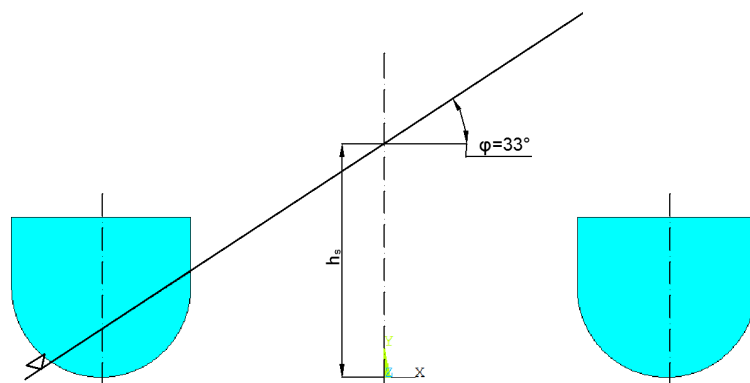
NAME	VALUE	TYPE	DIMENSIONS
CHYBA	0.793611154	SCALAR	
PLOCHA	618920.794	SCALAR	
SOURXV	361.266116	SCALAR	
SOURYV	286.145451	SCALAR	
UHELFI	5.00000000	SCALAR	
VYSKAHS	475.644800	SCALAR	



Obr. 5.4 - Nakloněné plováky o úhel  $\varphi=3^\circ$

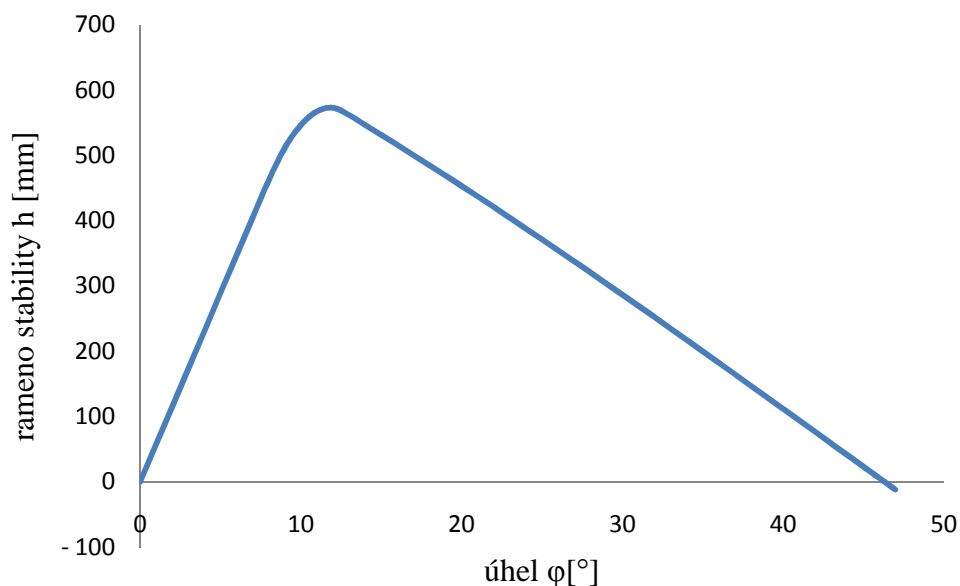


Obr. 5.5 - Nakloněné plováky o úhel  $\varphi=13^\circ$



Obr. 5.6 - Nakloněné plováky o úhel  $\varphi=33^\circ$

Postupným opakováním tohoto cyklu byla sestavena tabulka (viz níže) s hodnotami souřadnic těžišť a výškami  $h_s$  pro jednotlivé úhly náklonu. Reedův diagram pro tento konkrétní případ, vykreslený za pomoci programu Excel dosazením do (3.7), je na obr. 5.7. Dále bylo zjištěno, že k potopení pravého horního rohu pravého plováku dojde při úhlu naklonění přibližně  $\varphi=8^\circ$ , k potopení celého pravého plováku pak při úhlu cca  $\varphi=13^\circ$ . K úplnému převrnutí pak dojde především vlivem velmi nízko situovaného těžiště až při úhlu náklonu přibližně  $\varphi_p=46^\circ$ . Maximální rameno stability je  $h=573\text{mm}$  při úhlu náklonu zhruba  $\varphi=12^\circ$ . Celý proces zachycuje tabulka č.1 níže.



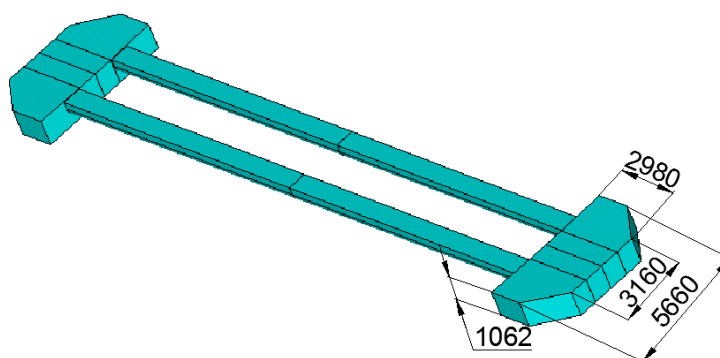
Obr. 5.7 - Reedův diagram pro plovoucí pásový dopravník s průběžnými plováky - 2D modelování

Tab.1 - Souřadnice těžiště ponořené plochy 2D modelování

$\varphi[^\circ]$	$h[\text{mm}]$	$x_p [\text{mm}]$	$y_p [\text{mm}]$	$h_s[\text{mm}]$
0	0,000	0,000	270,352	475,715
1	57,674	72,136	270,981	475,715
2	115,397	144,316	272,872	475,715
3	173,216	216,584	276,027	475,715
4	231,133	288,935	280,453	475,704
5	289,046	361,266	286,145	475,645
6	346,843	433,457	293,097	475,500
7	404,395	505,378	301,291	475,225
8	461,563	576,887	310,704	474,769
9	511,249	640,962	320,258	475,876
10	546,316	690,596	328,543	480,714
11	567,146	726,243	335,129	489,775
12	572,781	747,048	339,338	504,053
13	561,679	751,607	340,329	524,811
14	546,649	752,489	340,541	547,215
15	531,452	753,368	340,768	569,766
16	516,094	754,242	341,010	592,479
17	500,578	755,113	341,268	615,371
18	484,910	755,978	341,541	638,459
19	469,094	756,839	341,829	661,760
20	453,135	757,694	342,132	685,293
21	437,039	758,544	342,450	709,075
22	420,809	759,389	342,782	733,127
23	404,451	760,227	343,130	757,470
24	387,969	761,059	343,492	782,124
25	371,371	761,886	343,868	807,110
26	354,659	762,706	344,260	832,452
27	337,841	763,521	344,666	858,172
28	320,923	764,330	345,087	884,294
29	303,909	765,134	345,524	910,845
30	286,805	765,933	345,975	937,851
31	269,618	766,727	346,443	965,342
32	252,352	767,516	346,927	993,349
33	235,015	768,301	347,427	1021,902
34	217,612	769,081	347,943	1051,038
35	200,148	769,857	348,477	1080,792
36	182,630	770,630	349,028	1111,205
37	165,064	771,398	349,596	1142,317
38	147,455	772,163	350,183	1174,173
39	129,811	772,925	350,789	1206,822
40	112,137	773,683	351,414	1240,316
41	94,439	774,439	352,059	1274,709
42	76,723	775,191	352,725	1310,062
43	58,997	775,941	353,412	1346,438
44	41,267	776,688	354,122	1383,909
45	23,538	777,434	354,854	1422,550
46	5,818	778,177	355,611	1462,444
47	-11,888	778,919	356,392	1503,680

## 5.2 Stabilita pásového dopravníku s průběžnými plováky - 3D modelování

Postup řešení u 3D modelování byl obdobný jako u 2D modelování. Rozdíl spočíval v uvažování celého modelu i s koncovými plováky. S použitím výkresové dokumentace [7] byl vytvořen geometrický model v programu Ansys o rozměrech dle obr. 5.8, ostatní rozměry jsou shodné s 2D modelováním.

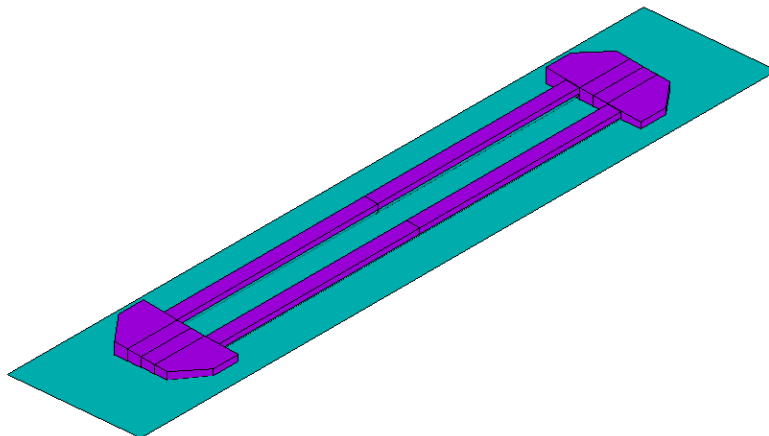


Obr. 5.8 - Geometrický 3D model průřezu plováku

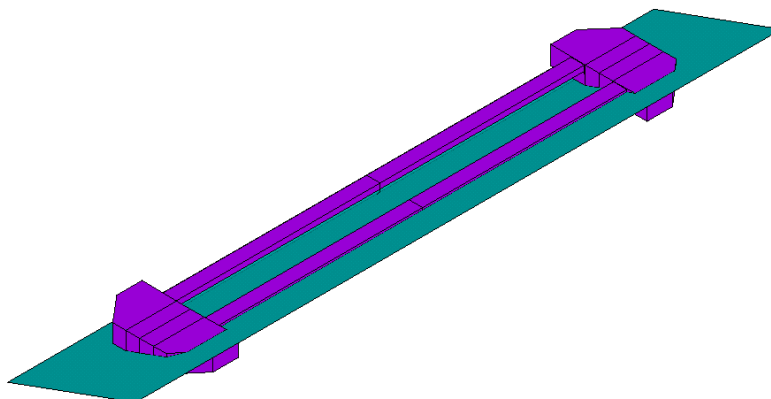
Určit hloubku  $h_k$ , ve které jsou za klidu ponořeny plováky dopravníku, bylo již komplikovanější než v předešlém případě, proto výpočet proběhl v programu Ansys s podmínkou velikosti ponořeného objemu dle (5.3)  $O=18,5676\text{m}^3$ . Měřeno ode dna koncového plováku pak  $h_k=492,2\text{mm}$ . Následně byl model řezán pod úhly  $\varphi=0^\circ$  až po  $\varphi_p$  s krokem  $2^\circ$ . Opět s vnořeným cyklem výpočtu hloubky  $h_s$ , což je průsečík hladiny vody s osou plováku ve stejném smyslu jako u 2D modelování, jen tentokrát není osa  $x$  v hloubce dna průběžných plováků, nýbrž koncových. Tato hloubka byla v každém kroku určena opět z podmínky o zachování konstantního ponořeného objemu s přesností  $10^{-5}\text{m}^3$ . Postup naklápění je vidět v několika polohách na obr. 5.9 až obr. 5.11, kde modrá plocha představuje hladinu. Opět výpis z programu Ansys pro úhel  $\varphi=5^\circ$ .

NAME	VALUE	TYPE	DIMENSIONS
CHYBA	4. 403749206E-05	SCALAR	
OBJEM	18. 5676440	SCALAR	
SOURXV	0. 545358916	SCALAR	
SOURYV	0. 305632539	SCALAR	
UHELFI	5. 00000000	SCALAR	
VYSKAHS	0. 484719000	SCALAR	

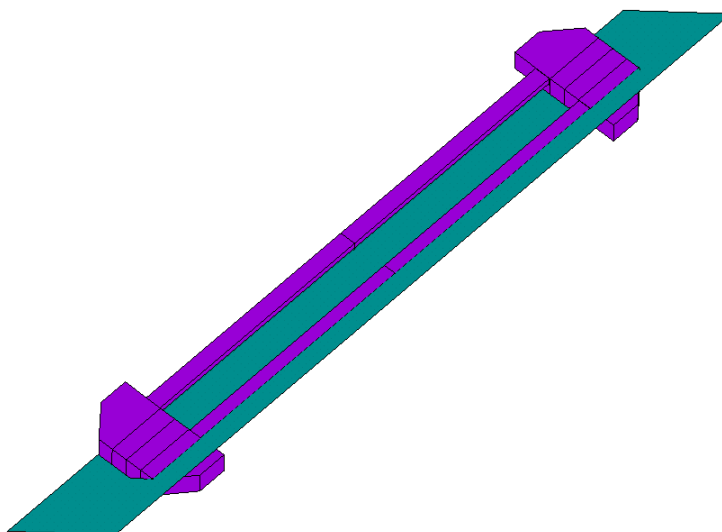




*Obr. 5.9 - Dopravník nakloněný o úhel  $\varphi=5^\circ$*

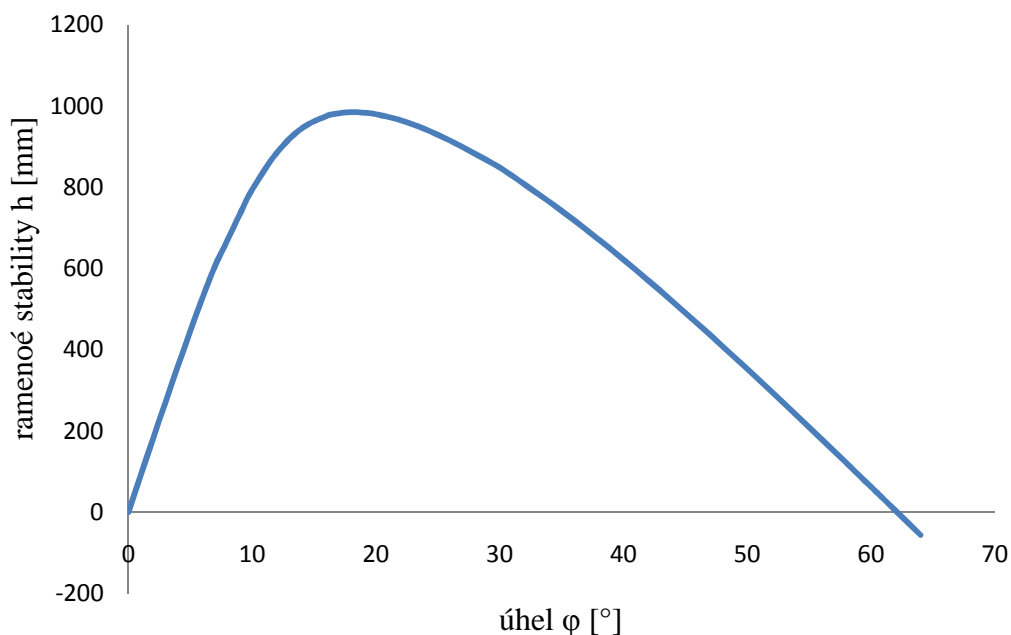


*Obr. 5.10 - Dopravník nakloněný o úhel  $\varphi=20^\circ$*



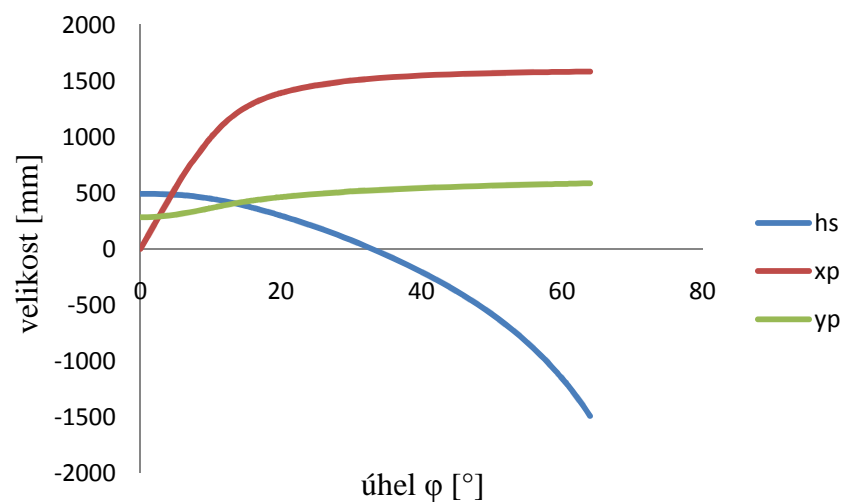
*Obr. 5.11 - Dopravník nakloněný o úhel  $\varphi=40^\circ$*

V každé z poloh byla zabudovanou funkcí programu Ansys spočítána poloha těžiště ponořeného objemu a následně zanesena do tabulky v programu Excel. Celý postup výpočtu byl zjednodušen opět použitím makra. Následoval opět výpočet ramene stability dle vztahu (3.7). Před samotným vykreslením bylo provedeno zjemnění kroku na  $1^\circ$  v některých důležitých fázích. Jednalo se především o počátek naklápění, pak fázi, kdy je maximální rameno stability  $h$  a konec, kdy se celý proces blíží úhlu překlopení dopravníku  $\varphi_p$ . Výsledný Reedův diagram je na obr. 5.12.



5.12 - Reedův diagram pro plovoucí pásový dopravník s průběžnými plováky - 3D modelování

K převrnutí dojde přibližně v úhlu  $\varphi_p=62^\circ$ . Maximální rameno stability  $h=985\text{mm}$  při úhlu naklopení  $\varphi=18^\circ$ . Dále byl zjištěn úhel, kdy se vynoří levá strana koncového plováku  $\varphi=9^\circ$ , k ponoření pravé strany pak dojde  $\varphi=13^\circ$ . Zajímavým jevem je postupné klesání hodnoty  $h_s$  viz graf na obr. 5.13, kde je tato hodnota zachycena i s průběhem hodnot souřadnic těžiště ponořeného objemu  $x_p$  a  $y_p$ . Celý průběh hodnot dále dokumentuje tabulka č.2 uvedená níže.



5.13 - Průběhy hodnot  $h_s$ ,  $x_p$  a  $y_p$

Tab.2 - Souřadnice těžiště ponořené plochy 3D modelování

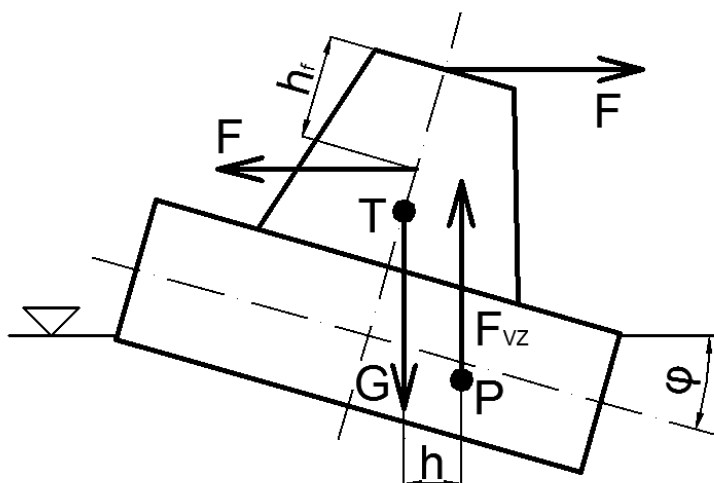
$\phi [^\circ]$	$h [mm]$	$x_p [mm]$	$y_p [mm]$	$h_s [mm]$
0	0	0	282,0398	492,17
1	91,22185	111,0645	283,0091	491,897
2	181,993	221,6725	285,9046	491,066
3	271,8296	331,3348	290,6912	489,644
4	360,1639	439,4801	297,3029	487,566
5	446,2473	545,3589	305,6325	484,719
6	528,9107	647,8077	315,4896	480,88
7	606,3408	745,0288	326,5629	475,675
8	669,7685	828,3409	337,5339	467,145
9	733,6551	912,105	350,0517	458,55
10	794,1114	992,4771	363,4876	449,444
12	885,5172	1124,235	388,9941	427,085
14	944,7092	1224,679	412,1002	399,44
16	975,2168	1297,655	431,581	368,064
17	982,0419	1326,213	440,0325	351,32
18	984,612	1350,846	447,794	333,93
19	983,664	1372,288	454,9637	315,917
20	979,7698	1391,105	461,6251	297,3
22	964,8723	1422,581	473,6838	258,274
24	942,5686	1447,878	484,4048	216,87
26	914,6152	1468,705	494,1037	173,036
28	882,2222	1486,215	503,0172	126,667
30	848,521	1503,16	512,4918	78,692
32	807,0975	1514,067	519,0438	26,283
34	764,2476	1524,368	525,7296	-27,46
36	718,9239	1533,166	531,8842	-83,555
38	671,3062	1540,611	537,4902	-142,45
40	621,7249	1546,964	542,632	-204,53
42	570,4505	1552,428	547,3785	-270,24
44	517,7095	1557,159	551,7864	-340,098
46	463,6952	1561,278	555,9031	-414,708

48	408,5773	1564,884	559,7675	-494,793
50	352,5076	1568,054	563,4126	-581,215
52	295,6229	1570,852	566,8665	-675,014
54	238,0499	1573,332	570,1534	-777,46
56	179,9042	1575,531	573,2949	-890,106
58	121,2984	1577,488	576,3082	-1014,91
60	62,33695	1579,233	579,2097	-1154,35
61	32,75446	1580,034	580,6229	-1230,51
62	3,120112	1580,789	582,0136	-1311,58
63	-26,554	1581,5	583,3832	-1398,11
64	-56,2556	1582,172	584,7328	-1490,74

Závěrem této kapitoly je ještě vhodné zhodnotit rozdíl ve výsledcích mezi zvolenými 2D a 3D postupy. Je zřejmé, že zanedbání koncových plováků nám dá jen velmi nepřesné a zkreslené informace o skutečném chování pásového dopravníku s průběžnými plováky. Z tohoto důvodu je 2D varianta řešení v tomto případě nevhodná.

## 6. Dynamická stabilita plovoucí otoče

Předmětem této kapitoly bude určit dynamickou stabilitu plovoucí otoče z kapitoly 4. Z důvodu omezeného rozsahu zde bude uveden výpočet pouze pro příčnou stabilitu, podélná stabilita je vyšší (viz kapitoly 4.1 a 4.2), postup by byl zcela shodný. Dynamická stabilita je definována na základě práce, kterou vykonají klopný a stabilizující moment. Stabilizující moment  $M_S$  je momentem silové dvojice vztlakové síly  $F_{vz}$  a tíhové síly  $G$  na rameni stability  $h$ . Předpokládá se plování otoče na hladině, tudíž vztlaková i tíhová síla jsou stejně velké. Rameno stability  $h$  pak bylo důkladně odvozeno i popsáno v kapitole 4.1. Klopný moment  $M_K$  je pak moment silové dvojice od tažných sil  $F$ , kterými na otoč působí v různých výškách pásové dopravníky. Tato silová dvojice pak působí na rameni  $h_f$ , což je kolmá vzdálenost mezi oběma dopravníky. Celá situace je znázorněna na náčrtku obr. 6.1.



Obr. 6.1 - Klopný a stabilizující moment

Oba momenty tedy jsou:

$$M_S = G \cdot h = F_{vz} \cdot h \quad (6.1)$$

$$M_K = F \cdot h_f \cdot \cos(\varphi) \quad (6.2)$$

Práce je obecně dána jako součin síly a dráhy pro přímočarý pohyb, respektive úhlu a momentu pro rotační pohyb. Práce stabilizujícího i klopného momentu pro naklápění tedy budou:

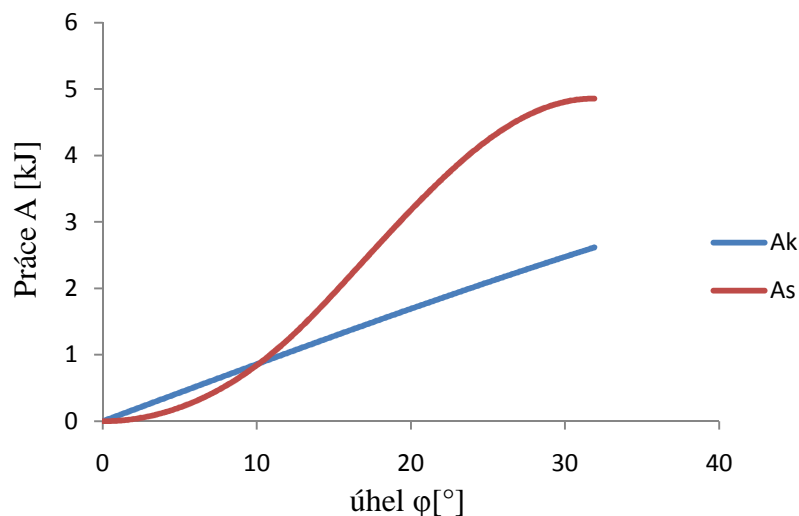
$$A_S = \int_0^\varphi G \cdot h_{(\varphi)} \cdot d\varphi = G \cdot \int_0^\varphi h_{(\varphi)} \cdot d\varphi \quad (6.3)$$

$$A_K = \int_0^\varphi F \cdot h_f \cdot \cos(\varphi) \cdot d\varphi = F \cdot h_f \cdot \int_0^\varphi \cos(\varphi) \cdot d\varphi = F \cdot h_f \cdot \sin(\varphi) \quad (6.4)$$

Uvažované rozměry plováku jsou uvedeny v kapitole 4.1 (viz obr. 4.3). Výškový rozdíl  $h_f=1,92\text{m}$  byl odečten z výkresové dokumentace [6]. Z důvodu obvyklého požadavku na maximální naklonění vlivem dynamicky působícího klopného momentu  $\varphi_{\max}=10^\circ$  byla postupně upravována velikost síly  $F$  tak dlouho, dokud nedošlo k dostatečnému přiblížení této hodnotě. K vykreslení grafu zachycujícího obě práce na obr. 6.2 došlo opět v programu Excel. Křivka popisující práci stabilizujícího momentu je vykreslena numerickou integrací tabelovaných hodnot z kapitoly 4.1 dle vztahu (6.3) lichoběžníkovým pravidlem. Tíhová síla  $G$  (6.5) je pak součin hmotnosti otoče  $m_c=9454\text{kg}$  (4.2) a tíhového zrychlení  $g=9,81\text{m/s}^2$ .

$$G = m_c \cdot g = 9454 \cdot 9,81 = 92743,74\text{N} \quad (6.5)$$

Práce klopného momentu pak dle vztahu (6.4).



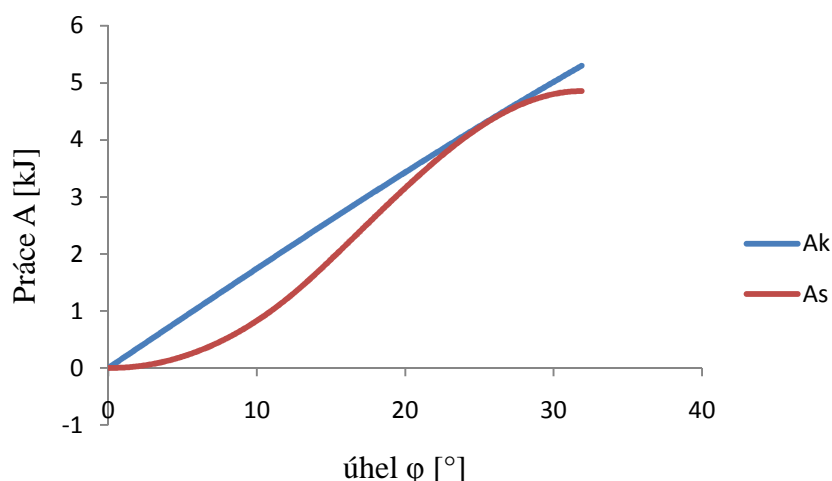
Obr. 6.2 - Práce klopného a stabilizujícího momentu pro  $F=2,528\text{kN}$

Na začátku pohybu je větší hodnota práce klopného momentu, práce stabilizujícího momentu však narůstá, až se obě práce v úhlu naklonění  $\varphi_{\max}=10^\circ$  vyrovnají. Ze zákona o změně kinetické energie vyplývá, že je-li celková práce nulová, je i změna kinetické energie nulová, naklápění se tedy zastaví a otoč se začne vracet do rovnovážné polohy (viz

další odstavec). Maximální doporučená tažná síla, jež byla zjištěna, je  $F=2,528\text{kN}$ . Vlivem síly  $F$  této velikosti nedojde k většímu naklonění než je  $10^\circ$ . Z obr. 6.2 je zřejmé, že velikost práce stabilizujícího momentu nadále narůstá rychleji, než práce klopného momentu, což je zárukou jisté míry bezpečnosti a pokrývá možnost malých nepřesností ve výpočtu.

Při zatížení tažnou silou  $F$  není rovnovážná poloha totožná s polohou nenakloněného tělesa, nýbrž s polohou danou statickou stabilitou. Tato poloha vyplývá z rovnosti klopného a stabilizujícího momentu, úhel naklonění je v této poloze vždy větší než  $0^\circ$  a těleso v této poloze setrvává do odstranění účinků vnějších sil, vytvářejících výsledný klopný moment. Položíme-li vztah (6.1) roven vztahu (6.2), lze tento úhel snadno zjistit. Zde bylo řešení opět provedeno v programu Excel. Síla  $F_{vz}$  je pro uvažované plovoucí těleso rovna tíhové síle dle (6.5). Pro sílu  $F=2,528\text{kN}$  jsou si oba momenty rovny při úhlu naklonění  $\varphi=5,1^\circ$ .

Na obr. 6.3 je vykreslen stejný graf, jako v předešlém případě, jen pro hodnotu síly  $F=5,224\text{kN}$ . Opětovným výpočtem bylo zjištěno, že se jedná o mezní stav. Práce klopného momentu je vždy větší než stabilizujícího, jen na krátký okamžik při úhlu  $\varphi_{mez}=25,7^\circ$  se obě křivky dotknou. V tomto úhlu se naklápění zastaví a otoč se začne vracet do rovnovážné polohy. Dle postupu z předešlého odstavce byl zjištěn úhel naklonění v rovnovážné poloze  $\varphi=10^\circ$ . Dojde-li jen k mírnému zvětšení síly, otoč se nekontrolovatelně převrhne.



Obr. 6.3 - Práce klopného a stabilizujícího momentu pro  $F=5,224\text{kN}$

V následující tabulce č.3 jsou uvedeny hodnoty síly  $F$  s krokem  $0,5\text{kN}$ , k nim příslušné úhly, při kterých dojde k zastavení naklápění, úhly rovnovážných stavů, velikosti ramene  $h$ , velikost integrálu  $\int_0^\varphi h_{(\varphi)} \cdot d\varphi$  a velikosti prací  $A_S$  a  $A_K$ . Obě práce by měly být stejně velké, původní tabulace však byla s krokem  $0,1^\circ$ , proto se od sebe mírně liší. Vždy byl brán takový úhel  $\varphi$ , při kterém byla výsledná chyba minimální.

Tab.3 - Úhly zastavení naklápění pro různé síly  $F$

Tažná síla $F$ [kN]	Úhel zastavení $[\varphi]$	Rovnovážný stav $[\varphi]$	$\int_0^\varphi h_{(\varphi)} \cdot d\varphi$ [mm]	Rameno stability $h$ [mm]	Práce $A_K$ [J]	Práce $A_S$ [J]
0,5	$2^\circ$	$1^\circ$	0,4	20	33,5	33
1	$4^\circ$	$2^\circ$	1,4	41	133,9	132,4
1,5	$6^\circ$	$3^\circ$	3,2	62	301	299,2
2	$8^\circ$	$4^\circ$	5,8	84	534	535,2
2,5	$9,9^\circ$	$5^\circ$	8,9	105	825,3	825,6
3	$11,7^\circ$	$6^\circ$	12,5	126	1168	1162,8
3,5	$13,6^\circ$	$6,9^\circ$	17,1	146	1580,2	184,8
4	$15,5^\circ$	$7,8^\circ$	22,1	155	2052,4	2051,1
4,5	$17,9^\circ$	$8,7^\circ$	28,7	156	2655,6	2659
5	$21,4^\circ$	$9,6^\circ$	37,8	141	3502,8	3506



## 7. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnotit stabilitu proti převržení pásových dopravních tratí, zajišťujících dopravu vytěženého materiálu přes vodní hladinu. Úvodem byly vysvětleny jevy, jako je vztlaková síla či výpočet těžiště plochy a hmot a pojmy týkající se stability plavidla. Následně proběhlo analytické stanovení stability tratě využívající plovoucí otoče pro spojení jednotlivých částí. Výstupem řešení byla soustava vztahů, ze kterých byl vykreslen diagram statické stability (Reedův diagram), ve kterém je vynesena závislost velikosti ramene stability na úhlu naklonění. Zjištěné maximální hodnoty úhlu naklonění, způsobeného vlivem vnějších míjivých sil, se liší pro podélné a příčné naklápění. Při naklápění okolo podélné osy (kolébání) je otoč schopna se vrátit do původní polohy až do úhlu naklonění  $\varphi_p=31,9^\circ$ , a to s maximálním ramenem stability  $h_{\max}=156,9\text{mm}$ . Pro naklápění okolo příčné osy (houpání) jsou pak tyto hodnoty  $\varphi_p=43,7^\circ$  a  $h_{\max}=597,9\text{mm}$ . U této konstrukční varianty byla v závěru práce vyhodnocena i dynamická stabilita pro naklápění okolo podélné osy. Naklápění bylo uvažováno vlivem momentu silové dvojice od tažných sil, kterými působí připevněné pásové dopravníky na otoč. Výstupem tohoto řešení je právě maximální velikost této tažné síly. Pro obvykle udávanou maximální doporučenou hodnotu naklonění  $\varphi=10^\circ$  pak vyšla tato síla  $F=2,528\text{kN}$ . Dále bylo zjištěno, že k převrnutí otoče dojde při aplikaci tažné síly o velikosti  $F=5,224\text{kN}$ .

Dále se práce zabývala řešením této problematiky metodou modelování. Tato metoda je vhodná pro plováky složitého tvaru, u kterých by analytická metoda vedla k velmi komplikovaným vztahům, neztídká neřešitelným. Modelování proběhlo pro plovoucí pásový dopravník s průběžnými plováky, tedy pro jiné konstrukční řešení, než tomu bylo u metody analytické. U tohoto řešení jsou na spodní stranu po celé délce dopravníku připevněny dva půlválcové plováky. Pro zvýšení stability jsou navíc na obou koncích dopravníku instalovány značně rozšířené koncové plováky. Toto technické řešení má značně větší stabilitu pro naklápění okolo příčné osy, proto zde nebylo řešeno. Pro 2D modelování nebyly brány v úvahu koncové plováky. Řešení proběhlo v programu Ansys, ve kterém byly postupně získávány hodnoty polohy těžiště ponořené plochy pro různé úhly naklonění. Zanesení těchto hodnot do tabulky umožnilo vykreslení Reedova diagramu s následujícími hodnotami  $\varphi_p=46^\circ$  a  $h_{\max}=573\text{mm}$ . Pro 3D modelování již bylo uvažováno i s koncovými plováky. Vypočtené výsledky touto variantou jsou  $\varphi_p=62^\circ$

a  $h_{\max}=985\text{mm}$ . Je tedy zřejmé, že zanedbání koncových plováků dává zcela mylné řešení a nelze jej tedy brát v potaz.

Z těchto výsledků je patrné, že technické řešení používající průběžné plováky je značně stabilnější než řešení využívající plovoucí otoče.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Juliš K., Tepřík O., Slavík A. *Statika*. SNTL, Praha, 1987
- [2] Žádník B. *Stavba a opravy lodí*. Nakladatelství dopravy a spojů. Praha, 1980.
- [3] Vocilka J. *Pravidla pro klasifikaci a stavbu plavidel vnitrozemské plavby. Část IV. Stabilita*. Český lodní a průmyslový registr. Praha, 1995.
- [4] Hrabovský L., Polák J., Podešva J., Richtář R., Hromada R. *Bezpečnost vícesekčních plovoucích pásových dopravních tras. Etapa č.3 - Modelování a kontrolní výpočty*. Projekt VaV ČBU č. 62-08, Ostrava 2009
- [5] Kučera R., *Numerické metody*. ISBN 80-248-1198-7
- [6] Plovoucí otoč 650, výkres č. 09007-1/03 M/D2, Pro Sand Engineering spol. s r.o.
- [7] Dopravníková trasa, výkres č. 27110-00-00-000, ALHOZD spol. s r.o.

## PŘÍLOHY

### 1. Makro použité v kapitole 5.1 Stabilita pásového dopravníku s průběžnými plováky - 2D modelování:

/FILENAME,2D

resume ! obnovení modelu

vyskahS=1474.6695 ! zadání výšky hs

uhelfi=46.3 ! zadání úhlu naklopení

/PREP7

WPSTYLE,,,,,,,,,1 ! zobrazit pracovní rovinu work plane

WPCSYS,-1,0 ! zarovná work plane podle globálního sour. syst.

wpro,,,-90.000000, ! natočení o 90 st.

wpoff,0,0,vyskaHs ! posunutí o hS

wpro,,,-uhelfi ! natočení o úhel fi

ASBW,all ! řiznutí ploch pracovní rovinou

KSEL,S,LOC,Y,706,708 ! vyber key-pointu

KSEL,r,LOC,x,-1650,-860 ! vyber key-pointu

LSLK ! vyber cary

ASLL ! vyber plochy

ASEL,INVE ! inverze / vyber to co není vybráno

LSLA ! vyber car

KSLL ! vyber ploch

aplot ! nakreslí plochy

ASUM ! výpočet

\*GET,plocha,area,0,area ! vypíše velikost ponořené plochy

\*GET,sourxv,area,0,cent,x ! vypíše souřadnici x těžiště ponořené plochy

\*GET,souryv,area,0,cent,y ! vypíše souřadnici y těžiště ponořené plochy

chyba=plocha-618920 ! výpočet odchylky od požadované velikosti ponořené plochy

\*STATUS

FINISH

## 2. Makro použité v kapitole 5.2 Stabilita pásového dopravníku s průběžnými plováky - 3D modelování:

/FILENAME,3D

resume ! obnovení modelu

vyskahS=0.39944 ! zadání výšky hs

uhelfi=14 ! zadání úhlu naklopení

/PREP7

WPSTYLE,,,,,,,,,1 ! zobrazit pracovní rovinu work plane

WPCSYS,-1,0 ! zarovnat work plane podle globálního sour. syst.

wpro,,-90.000000, ! natočení o 90 st.

wpoff,0,0,vyskaHs ! posunutí o hS

wpro,,-uhelfi ! natočení o úhel fi

VSBW,all ! říznutí objemu pracovní rovinou

CMSEL,s,k1 ! selekce komponenty

CMSEL,a,k2

CMSEL,a,k3

CMSEL,a,k4

CMSEL,a,k5

LSLK ! vyber cary

ASLL ! vyber plochy

VSLA ! vyber objemy

ASLV ! vyber plochy

LSLA ! vyber car

KSLL ! vyber ploch

VPLOT ! vykresli objemy

VSUM !vypocet

\*GET,objem,volu,0,volu !vypise velikost ponoreneho objemu

\*GET,sourxv,volu,0,cent,x ! vypise souradnici x tesziste ponoreneho objemu

\*GET,souryv,volu,0,cent,y ! vypise souradnici y tesziste ponoreneho objemu

chyba=objem-18.5676 ! vypocita odchylku od pozadovane velikosti ponoreneho objemu

\*STATUS

FINISH